
BACHELORARBEIT

Herr
Martin Kunze

**Tragfähigkeitsuntersuchung
von Mehrscheiben-Isolierglas**

Mittweida, 2010

BACHELORARBEIT

Tragfähigkeitsuntersuchung von Mehrscheiben-Isolierglas

Autor:

Herr

Martin Kunze

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM06w1-B

Erstprüfer:

Herr Prof. Dipl.-Ing. Torsten Laufs

Zweitprüfer:

Dr. Dipl.-Ing. Frank Purtak

Einreichung:

Dresden, 24.11.2010

Verteidigung/Bewertung:

Roßwein, 2011

Bibliografische Angaben:

Kunze, Martin:

Tragfähigkeitsuntersuchung von Mehrscheiben-Isolierglas - 2010 – 12 Seiten

Verzeichnisse, 82 Seiten Inhalt, 11 Seiten Anlagen, 105 Seiten insgesamt

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,

Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2010

Referat:

Inhalt der Arbeit sind Untersuchungen über das Tragverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas, die u.a. das unterschiedliche Verhalten verschiedenen Lasten aufzuzeigen. Die Auswertungen der ermittelten Ergebnisse geschehen durch das Erstellen von Traglastdiagrammen, die zur Vorbemessung und zum Nachweis dienen. Weiterhin erfolgt eine theoretische Ausarbeitung zum Glasbau mit anschließendem Beispiel zur Gegenüberstellung von zwei verschiedenen Sicherheitskonzepten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Allgemeines	9
1.2	Ziel der Arbeit	10
1.3	Abgrenzung	10
2	Aufbau und Einteilung von Isolierglas	11
2.1	Materialarten	11
2.1.1	Glasscheiben	11
2.1.2	Dichtung	14
2.1.3	Distanzrahmen	14
2.1.4	Füllung	14
2.1.5	Scheibenzwischenraum	14
2.2	Aufbau von Isoliergläsern	15
2.2.1	Scheibenaufbau	15
2.2.2	Lagerung	15
2.2.3	Klotzung	16
2.3	Einteilung der Isoliergläser	17
2.3.1	physikalischen Eigenschaften	17
2.3.2	Fertigung und Aufbau	20
2.3.3	Randverbund	21
3	Lastannahmen für Glasscheiben	22
3.1	Eigenlast	22
3.2	Schnee	22
3.3	Wind	24
3.4	Klima	27
3.5	Lastkombination	28
4	Baurechtliche Grundlagen	29
4.1	Genehmigungsverfahren	29
4.1.1	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (AbP)	29
4.1.2	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ)	31
4.1.3	Europäische Technische Zulassung (ETZ)	32
4.1.4	Zustimmung im Einzelfall (ZiE)	33

4.1.5	Übereinstimmungsnachweis	34
4.2	Zustimmungspflichtige Bauteile	35
4.2.1	Punktgelagerte Verglasung	35
4.2.2	Structural-Glazing-Fassaden	37
4.2.3	Horizontalverglasung	39
4.2.4	Tragende Glasbauteile	43
4.3	Regelwerke	45
4.3.1	Bauordnungen	45
4.3.2	Bauregellisten (BRL).....	47
4.3.3	Bauproduktengesetz (BauPG).....	48
4.3.4	Bauproduktenrichtlinie (BPR)	48
4.3.5	Technischen Baubestimmungen.....	49
4.3.6	Technische Regeln	50
4.3.7	Normen	54
5	Tragsicherheitsnachweise für Glasscheiben	55
5.1	Theoretische Ansätze	55
5.1.1	Besonderheiten.....	56
5.1.2	Sicherheitskonzepte	62
5.1.3	Anwendung im Glasbau.....	66
5.2	Nachweise nach Normen und Richtlinien	70
5.2.1	Technische Regeln	70
5.2.2	E DIN 18008: 2009-07	71
5.2.3	Beispiel	72
6	Bestimmung der Scheibendicken von MIG	77
6.1	Untersuchungsparameter	77
6.2	Ergebnisdarstellung der zu untersuchenden Varianten	82
6.3	Auswertung.....	88
7	Zusammenfassung	89
Anlage A	90
Anlage B	97
Literatur	101
Eidesstattliche Erklärung	105

Abbildungsverzeichnis

<i>Bild 1: Beispiel für die Verwendung von Glas [54]</i>	9
<i>Bild 2: Bruchbild von ESG [10]</i>	12
<i>Bild 3: Spannungszustand bei biegebeanspruchtem ESG [10]</i>	12
<i>Bild 4: Repräsentatives Bruchbild von TVG nach DIN EN 1863 [10]</i>	13
<i>Bild 5: Aufbau VG [10]</i>	13
<i>Bild 6: Aufbau VSG [10]</i>	13
<i>Bild 7: Aufbau MIG [6, Bild 4.4]</i>	15
<i>Bild 8: Linienförmige Lagerungen [15, Bild 5.1]</i>	15
<i>Bild 9: Verklotzung von Isolierglas [17]</i>	16
<i>Bild 10: Zwängungsarme Lagerung in Scheibenebene [17]</i>	16
<i>Bild 11: Unterschied zwischen Isolier- und Wärmeschutzverglasung [13]</i>	17
<i>Bild 12: Möglichkeiten für die konstruktive Ausbildung des Sonnenschutzes [14]</i>	18
<i>Bild 13: Aufbau einer Schallschutzverglasung [14]</i>	19
<i>Bild 14: Aufbau einer VSG-Scheibe [15]</i>	19
<i>Bild 15: Butylrandverbund mit Aussteifung [14, Bild 2.1.36]</i>	21
<i>Bild 16: Butylrandverbund ohne Aussteifung [14, Bild 2.1.37]</i>	21
<i>Bild 17: Lastbild der Schneelast für flache und einseitig geneigte Dächer [3, Bild 4]</i>	24
<i>Bild 18: Abmessung und Einteilung der Flächen für Vordächer [4, Bild 1]</i>	26
<i>Bild 19: Verformungen durch Änderung des Luftdrucks und der Temperatur [10, Bild 1]</i>	27
<i>Bild 20: Pendelschlagversuch [23]</i>	30
<i>Bild 21: Doppelreifen-Pendelkörper nach DIN EN 12600 [10]</i>	30
<i>Bild 22: Pendelschlagversuch [10]</i>	30
<i>Bild 23: Ablauf zur Erlangung einer abZ [21, Ablaufdiagramm]</i>	31
<i>Bild 24: Ablauf zur Erlangung einer ETA [21, Ablaufdiagramm]</i>	32
<i>Bild 25: Lagerung punktgehaltener Verglasungen [10]</i>	36
<i>Bild 26: Haltekonstruktion zur punktförmigen Lagerung (Spider) [10]</i>	36
<i>Bild 27: verklebten Profilgläser mittels Structural-Glazing-Silikon mit Aluminiumprofilen [10]</i>	37
<i>Bild 28: Structural-Glazing-Fassade [27]</i>	37
<i>Bild 29: SSG mit mechanischer Sicherung</i>	38
<i>Bild 30: SSG mit eingeschobenen Profil</i>	38
<i>Bild 31 und 32: begehbare Verglasung [28],[29]</i>	39
<i>Bild 33: Aufbau einer begehbaren Glasscheibe (Angaben in mm)</i>	40

<i>Bild 34: Aufbau einer betretbaren Isolierverglasung</i>	41
<i>Bild 35: umlaufend linienförmig gelenkig gelagerte Rechteckplatte [6]</i>	42
<i>Bild 36: zweiseitig linienförmig gelenkig gelagerte Rechteckplatte [6]</i>	42
<i>Bild 37: Glaspulldach im Atrium der IHK München [10]</i>	43
<i>Bild 38: Lochleibungsverbindung im Glasbau [10]</i>	43
<i>Bild 39: Bildungswerk der sächsischen Wirtschaft (Foto: Christoph Reichelt)</i>	44
<i>Bild 40: Ganzglasecke mit gestuftem Isolierglas [10]</i>	44
<i>Bild 41: Ganzglasecke mit auf Gehrung ausgeführtem Isolierglas [10]</i>	44
<i>Bild 42: Beispiel Kategorie A [41]</i>	51
<i>Bild 43: Beispiel Kategorie B [41]</i>	51
<i>Bild 44: Beispiel Kategorie C [41]</i>	52
<i>Bild 45: Maximale und minimale Abstände vom Glasrand bis zum Lochanfang [33]</i>	53
<i>Bild 46: Aktivierung von Membranwirkung [15, Bild 6.35]</i>	56
<i>Bild 47: Kugelfallversuch nach DIN 52338 [50]</i>	58
<i>Bild 48: Pendelschlagversuch mit verformbarem Stoßkörper [44]</i>	58
<i>Bild 49: Spannungsverlauf bei VSG mit verschiedenem Schubverbund [44, Fig. 19]</i>	60
<i>Bild 50/ 51: Resttragfähigkeit einer Treppenstufe, VSG aus TVG für eine Überdachung [44, Fig.78]</i>	61
<i>Bild 52: γ_R in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Biegesteifigkeit [51]</i>	65
<i>Bild 53: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Klimalast</i>	78
<i>Bild 54: charakteristische Länge a^* in Abhängigkeit zur Glasscheibendicke</i>	79
<i>Bild 55: Isolierglasfaktor ϕ in Abhängigkeit zur Glasscheibendicke</i>	79
<i>Bild 56: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Windlast</i>	79
<i>Bild 57: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Lastkombination Wind- und Klimalast</i>	80
<i>Bild 58: grafische Darstellung der Ergebnisunterschiede</i>	81
<i>Bild 59: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 0,35 \text{ kN/m}^2$</i>	82
<i>Bild 60: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 0,5 \text{ kN/m}^2$</i>	82
<i>Bild 61: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 0,75 \text{ kN/m}^2$</i>	83
<i>Bild 62: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 1,0 \text{ kN/m}^2$</i>	83
<i>Bild 63: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 1,25 \text{ kN/m}^2$</i>	84
<i>Bild 64: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 1,5 \text{ kN/m}^2$</i>	84

<i>Bild 65: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 1,75 \text{ kN/m}^2$</i>	85
<i>Bild 66: maximale Ausnutzung η infolge Klimalast und veränderlicher Last von $q_w = 2,0 \text{ kN/m}^2$</i>	85
<i>Bild 67: Bemessungsdiagramm $q_{w, \max}$ für 4SPG/ 16SZR/ 4SPG</i>	86
<i>Bild 68: Bemessungsdiagramm $q_{w, \max}$ für 8SPG/ 16SZR/ 8SPG</i>	87
<i>Bild 69: Transformation des Dreiecks [49]</i>	91

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: physikalische Werkstoffeigenschaften von Glas.....	11
Tab. 2: Charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden [8, Tafel 3.35]	23
Tab. 3: Windzonen, [2, Bild A.1].....	24
Tab. 4: Böengeschwindigkeitsdruck für Bauwerke über 25 m sowie im Regelfall [2]	25
Tab. 5: Aerodynamische Beiwerte $c_{pe,net}$ für den resultierenden Druck an Vordächern [4,	
Tab. 1].....	26
Tab. 6: Rechenwerte für klimatische Einwirkungen und den resultierenden isochoren	
Druck p_0	28
Tab. 7: Ablauf des Verfahrens zur Erlangung einer ZiE.....	33
Tab. 8: zustimmungspflichtige punktgelagerte Glasbauteile [33].....	36
Tab. 9: Unterscheidung der Bauprodukte nach MBO [6, Tab. 2.1]	46
Tab. 10: Normenübersicht.....	54
Tab. 11: Berechnungsmöglichkeiten für Spannung und Durchbiegung von Platten mit 4-	
seitigen Lagerung [48]	55
Tab. 12: Verteilung der Einwirkungen bei einer Isolierglasscheibe [8; Tab. A2]	57
Tab. 13 Resttragfähigkeit von VSG für verschiedene Glasarten und Lagerungsarten [44]	
.....	61
Tab. 14: Zulässige Biegespannungen, 5 % - Fraktilwert der Biegezugfestigkeit und	
zugehöriger	63
Tab. 15: Durchbiegungsbegrenzung [8, Tab. 3].....	63
Tab. 16: Einflussfaktoren η_F zur Berücksichtigung der Flächengröße von 4- seitig	
linienförmig.....	65
Tab. 17: Einflussfaktoren η_D der Belastungsdauer auf die Glassteifigkeit nach Shen [51]	65
Tab. 18: Technische Regeln und Normen [29]	66
Tab. 19: Klimawerte für Isolierglas [29].....	67
Tab. 20: Modifikationsbeiwert für Basisgläser [52, Tab. 6]	68
Tab. 21: Widerstandswerte f_k von Glaserzeugnissen [29]	68
Tab. 22: Durchbiegungsbegrenzung [52, Tab.].....	69
Tab. 23: Untersuchungsparameter	77
Tab. 24: Beiwerte für linienförmig gelagerte Rechteckplatten [49].....	90
Tab. 25: Beiwerte für Sonderformen [49].....	90
Tab. 26: zulässige Biegespannungen für Einfach-Verglasungen in N/mm^2 [8].....	91
Tab. 27: zulässige Biegespannungen für Isolier-Verglasungen in N/mm^2 [8]	91

<i>Tab. 28: zulässige Biegespannungen für absturzsichernde Verglasungen in N/mm² [41]</i>	92
<i>Tab. 29: Verwendbare Glaserzeugnisse für linienförmig gelagerte Verglasungen</i>	
<i>[52, Tafel 17.13a]</i>	92
<i>Tab. 30: Zulässige Glasarten bei linienförmig gelagerten Überkopfverglasungen</i>	
<i>[52, Tafel 17.13b]</i>	93
<i>Tab. 31: Zulässige Glasarten für absturzsichernde Verglasung [52, Tafel 7.65]</i>	93
<i>Tab. 32: Linienförmig gelagerte Glasaufbauten mit nachgewiesener Stoßsicherheit</i>	
<i>[41, Tab.2]</i>	94
<i>Tab. 33: Zulässige Glasarten für absturzsichernde Verglasung [29]</i>	95
<i>Tab. 34: Empfehlung für den Randbereich</i>	99
<i>Tab. 35: Empfehlung für den Mittenbereich</i>	99
<i>Tab. 36: Empfehlung für den Randbereich</i>	100
<i>Tab. 37: Empfehlung für den Mittenbereich</i>	100

Abkürzungsverzeichnis

ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
ESG-H	Einscheiben-Sicherheitsglas mit Wärmebehandlung
SPG	Spiegelglas (Floatglas)
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
VG	Verbundglas
TVG	Telvorgespanntes Glas
MIG	Mehrscheiben-Isolierglas
MIG	Mehrscheiben-Isolierglas
SZR	Scheibenzwischenraum
MIG	Mehrscheiben-Isolierglas
TRLV	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen
TRAV	Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen
TRPV	Technische Regeln für die Bemessung und Ausführung einfacher punktförmig gelagerter Vertikal- und Überkopfverglasungen
MBO	Musterbauordnung
LBO	Landesbauordnung
AbZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AbP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
ZiE	Zustimmung im Einzelfall
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
LTB	Liste der Technischen Baubestimmungen
ETZ/ETA	Europäische Technische Zulassung/ European Technical Approval
BauPG	Bauproduktengesetz
SVA	Sachverständigenausschuss
BPR	Bauproduktenrichtlinie
BPL	Bauregellisten (A, B, C)
ETZ	Europäische Technische Zulassung
hEN	harmonisierte Europäische Norm
Ü	Übereinstimmungskennzeichen
CE	Conformité Européenne Kennzeichen

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Glas ist sehr vielseitiger Werkstoff, den man auf verschiedenste Weise verarbeiten kann (Flachglas, Glasfaser,...). Im Bauwesen gewinnt Glas zunehmend an Bedeutung und wird immer häufiger eingesetzt, da seine Entwicklung voran schreitet und seine bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften ständig verbessert wurden. Glas wird gegensätzlichen Anforderungen wie Widerstandsfähigkeit, Transparenz und Dauerfestigkeit gleichermaßen gerecht. Es kann als absturzsicherndes, tragendes oder raumabschließendes Element eingesetzt werden. Verglasungen schützen einerseits vor Feuchtigkeit, reduzieren Wärmeströme und Schalltransmission und gewährleisten andererseits eine hohe Lichtdurchlässigkeit.



Bild 1: Beispiel für die Verwendung von Glas [54]

Als Bemessungsgrundlagen für Glasbauteile existieren derzeit lediglich nur allgemein bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke, wie die *Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen* (TRLV; [8]) und die *Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen* (TRAV, [41]). Eine verbindliche Norm ist noch nicht eingeführt worden. Entsprechen sicherheitstechnisch relevante Glasbauteile nicht diesen Regelwerken und besitzen keine *allgemeine bauaufsichtliche Zulassung* (abZ), so benötigen sie eine *Zustimmung im Einzelfall* (ZiE, [25]).

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit *TW-Glas* das Tragverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas zu untersuchen und dabei das unterschiedliche Verhalten verschiedenen Lasten aufzuzeigen. Das von der Firma Trag Werk Ingenieure entwickelte Glasstatik-Programm ermöglicht dabei eine umfangreiche Parameteruntersuchung zur Klärung des Einflusses wesentlicher Geometrie- und Belastungsparameter. Dabei ist es erforderlich entsprechende Lastmodelle zu erstellen, an denen die Parameteruntersuchungen durchgeführt werden. Die Auswertungen der ermittelten Ergebnisse geschehen durch das Erstellen von Traglastdiagrammen, die zur Vorbemessung und zum Nachweis dienen. Anhand dieser Diagramme ist es dem Nutzer später möglich den Ausnutzungsgrad oder die maximale abzutragende Windlast für bestimmte Längen- und Breitenverhältnisse sowie für verschiedene Scheibenaufbauten abzulesen und damit schnell eine passende Scheibendicke zu ermitteln. Auf Seiten der Geometrieparameter wird der Einfluss der Scheibendicke, der Scheibenhöhe und –breite untersucht. Die Parameter der maßgebenden Einwirkungen resultieren dabei aus den Lastfällen Klima - Sommer/Winter und der veränderlichen Last sowie aus deren Kombinationen. Zum Vergleich erfolgen stichprobenartige Gegenrechnungen mit einem anderen FE-Programm und der Kirchhoff'schen Plattentheorie mittels Excel-Programmierung.

Weiterhin erfolgt eine theoretische Ausarbeitung zum Glasbau, welcher sich hauptsächlich auf Mehrscheiben-Isolierverglasung bezieht (Aufbau, Einteilung,...) aber auch einige Punkte enthält, die den gesamten Glasbau betreffen (Lastannahmen, Baurechtliche Grundlagen, Regelwerke, Tragsicherheitsnachweise).

Abschließend werden zwei verschiedenen Nachweiskonzepte vorgestellt und anhand eines Beispiels miteinander verglichen.

1.3 Abgrenzung

Die Tragfähigkeitsuntersuchungen erfolgen ausschließlich für vierseitig gelagerte Vertikalverglasung mit Zweischeiben-Isolierverglasung aus Spiegelglas. Die Vergleichsrechnungen werden nur punktuell durchgeführt.

2 Aufbau und Einteilung von Isolierglas

Sehr oft wird Mehrscheiben-Isolierglas (MIG) auch als Isolierglas bezeichnet. Es besteht aus mindestens zwei gleichen oder unterschiedlichen Glasscheiben, die durch einen Zwischenraum voneinander getrennt werden [12]. In Deutschland werden heutzutage fast alle Fenster in Gebäuden mit MIG ausgestattet, da infolge der notwendigen Energieeinsparung immer höhere Anforderungen an den Wärmeschutz bestehen. Durch die Wahl unterschiedlich dicker Glasscheiben, lässt sich zudem der Schallschutz verbessern. Für den Sonnenschutz ist das Aufdampfen von Metallen auf der Scheibeninnenseite möglich.

2.1 Materialarten

2.1.1 Glasscheiben

Die Glasscheiben bilden die Außenelemente einer Isolierverglasung und geben dem ganzen System die nötige Stabilität bzw. Steifigkeit. Sie können unterschiedlich ausfallen, je nachdem wie die Einsatzanforderungen sind. Da die Lastabtragung eine der Hauptaufgaben ist, ist der Begriff „Scheibe“ baumechanische eher ungünstig gewählt. Die Glasscheiben werden als allseitig liniengelagerte Platten angenommen [16].

Dichte	$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$
Elastizitätsmodul	$E = 70000 \text{ N/mm}^2$
Poissonzahl	$\nu = 0.23$
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_T = 9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Temperaturwechselbeständigkeit	$\Delta T = 30 - 40^\circ\text{C}$

Tab. 1: physikalische Werkstoffeigenschaften von Glas

Floatglas

Das am häufigsten verwendete Glas wird auch nach DIN 1249-3 (Flachglas im Bauwesen) und DIN 1259 (Glas) als Spiegelglas (SPG) bezeichnet. Es ist ein Basisglas, welches nach dem Floatverfahren in großen Mengen bis zu einem Bandmaß von $3,2 \times 6,0 \text{ [m}^2\text{]}$ und einer Glasdicke von $d = 2\text{-}19 \text{ mm}$ hergestellt wird. Durch seine glatte Oberfläche und die Möglichkeit den Lichttransmissionsgrad durch einfärben (Grün, Bronze, Grau) zu ändern, kann es vielseitig eingesetzt werden. Unter anderem dient es ebenfalls zur Weiterverarbeitung von vorgespannten Gläsern (ESG, TVG), Verbund- und Verbundsicherheitsgläsern (VG, VSG) und Isolierglas (MIG) [5], [10], [14], [15].

Einscheibensicherheitsglas (ESG, ESG-H)

Die Einscheibensicherheitsgläser sind thermisch vorgespannte Gläser, welche nach DIN 1249-12 geregelt sind. Die ebene Glasscheibe wird bis zum Transformationspunkt ($\geq 640^\circ\text{C}$) erhitzt und nach kompletter Durchwärmung schlagartig abgekühlt (z.B. mit kalter Luft). Die Oberfläche kühlt sich dadurch schneller ab und zieht sich zusammen, dadurch entsteht ein Eigenspannungszustand mit einer Druckspannung in der Oberfläche und einer Zugspannung im Kern. Das Glas wird somit widerstandsfähiger – die Biegebruchspannung und die Temperaturwechselbeständigkeit erhöhen sich. Wegen der hohen Energie im Eigenspannungszustand zerbricht das Glas bei einer Überbelastung nun in kleine stumpfkantige Stücke, was das Verletzungsrisiko erheblich senkt. Dadurch ist eine nachträgliche Bearbeitung nicht mehr möglich. Bohrungen, Ausschnitte oder Kantenbearbeitungen müssen vorher durchgeführt werden. Bei der Herstellung solcher Gläser ist die Gefahr groß, dass sich Nickelsulfid-Einschlüsse bilden, welche Spontanbrüche hervorrufen können. Dies kann durch Heat-Soak-Tests verhindert werden. Nach DIN 18516-4 lagert man die Scheibe bei einer Temperatur von 280 bis 300 Grad Celsius mehrere Stunden, um Einschlüsse zu reduzieren. Das Glas erhält nun die Bezeichnung ESG-H [5], [10], [14], [15].



Bild 2: Bruchbild von ESG [10]

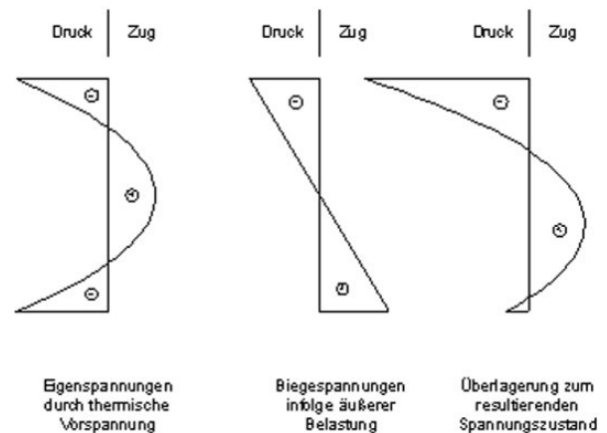


Bild 3: Spannungszustand bei biegebeanspruchtem ESG [10]

Teilvorgespanntes Glas (TVG)

Die Herstellung ähnelt der von ESG, nur dass die Abkühlung hier viel schneller erfolgt. Dadurch wird die Oberflächenspannung so groß, dass bei einer Überbelastung Radialbrüche entstehen. Es dürfen sich keine größeren selbstständigen Bruchinseln bilden. Das Bruchbild ähnelt dem von Floatglas. Die Biegefestigkeit ist geringer als bei ESG, da die eingeprägte Eigenspannung kleiner ist. Die Herstellung ist auf $1,1 \times 3,6 \text{ m}^2$, sowie eine maximale Scheibendicke von 12 mm begrenzt. Die Lagerung sollte vierseitig erfolgen, um die

spezielle Bruch eigenstruktur auszunutzen. Wegen der daraus folgenden hohen Resttragfähigkeit dient es auch zur Herstellung von VG und VSG. Eine nachträgliche Bearbeitung ist jedoch nicht mehr möglich [5], [10], [14], [15].

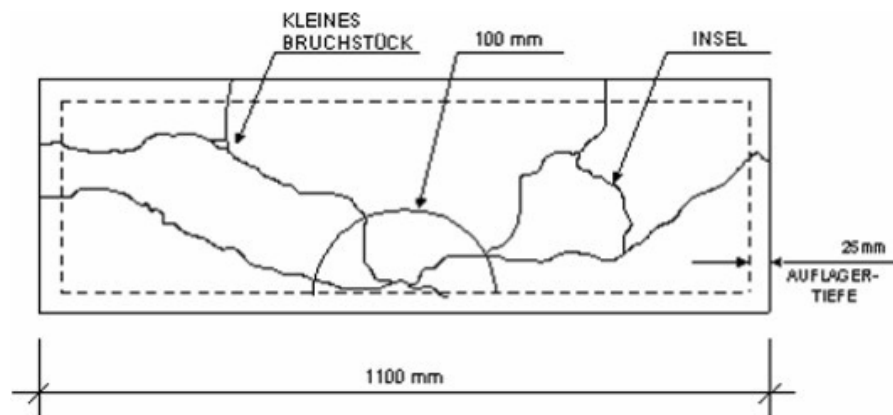


Bild 4: Repräsentatives Bruchbild von TVG nach DIN EN 1863 [10]

Verbund- und Verbundsicherheitsglas (VG, VSG)

VG-Scheiben werden in der EN 12337-3 geregelt, sie bestehen aus mindestens zwei Glasscheiben, die durch eine Zwischenschicht aus Reaktionsharz (1-4 mm) fest miteinander verbunden sind. Die Glaseinheiten müssen resistent gegen Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung sein. Auf Grund ihrer guten Eigenschaften können Scheiben mit Gießharz für schmale, lange Gläser mit Bohrungen mit kleinen Toleranzen eingesetzt werden, sowie für die Schalldämmung, da die Harzschicht auf spezielle Frequenzen einstellbar ist.

VSG-Scheiben sind in der EN12337-2 definiert. Die Glasscheiben werden hier im Gegensatz zu VG-Scheiben durch eine elastische, reißfeste Poly-Vinyl-Butyral-Folie (PVB-Folie, 0,38-1,56 mm) verbunden. Diese Folie hält beim Bruch die Splitter zusammen und erfüllt zusätzliche Anforderungen, wie Resttragfähigkeit und Widerstand gegen Anprall eines Körpers. Außerdem muss diese Glaseinheit stabil gegen Sonneneinstrahlung sein und die mechanischen und optischen Eigenschaften dürfen sich nicht verändern. In Deutschland bildet VSG immer einen Bestandteil bei Überkopfverglasung [5], [10], [14], [15].

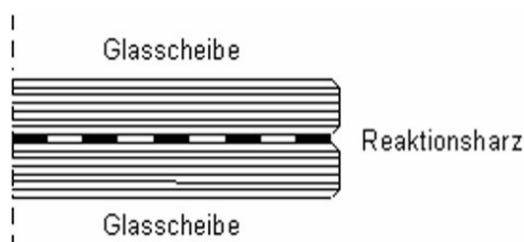


Bild 5: Aufbau VG [10]

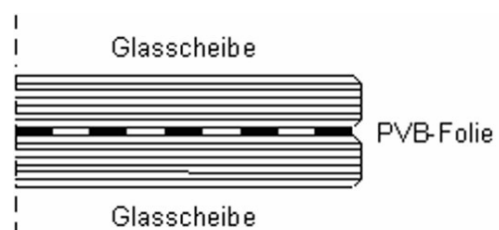


Bild 6: Aufbau VSG [10]

2.1.2 Dichtung

In einem Isolierglas befinden sich zwei Dichtungen. Zum Einem die Primärdichtung (z.B. Butyl, wegen seiner geringen Durchlässigkeit), sie verbindet den Distanzrahmen mit den Scheiben und schützt den Scheibenzwischenraum (SZR) vor Feuchtigkeit von Außen. Die Sekundärdichtung (z.B. Thiokol, Silikon-Kautschuk) schafft eine dauerhafte Verbindung der Glasscheiben und dichtet ebenfalls den SZR ab. Zusätzlich sollen beide Dichtungen das Entweichen der im SZR heute üblichen Edelgase verhindern [13], [5].

2.1.3 Distanzrahmen

Der Distanzrahmen besteht aus Aluminium, Kunststoff oder verzinkter Stahl und ist über die Primärdichtung mit den Glasscheiben verbunden. Seine Aufgabe ist es, die Einhaltung des Abstandes zu gewährleisten. Um bessere u-Werte zu erreichen werden heute auch thermoplastische Abstandshalter eingesetzt („warme Kante“¹, TPS = Thermo Plast Spacer) [5], [15].

2.1.4 Füllung

Die Füllung befindet sich im Distanzrahmen und besteht aus einem Trockenmittel (z.B. Zeolith-Granulat → poröse Silikatminerale) bzw. Molekularsieb was dafür sorgt, dass Feuchtigkeit abgebunden wird. Bei tiefen Temperaturen wird dadurch ein Beschlagen verhindert [5], [13].

2.1.5 Scheibenzwischenraum

Der Scheibenzwischenraum ist ein mit Gas (z.B. Argon) oder Luft gefüllter Bereich, der nach außen hermetisch abgeschlossen ist und zur Verbesserung der Wärmedämmung dient. Bei Isolierverglasung hat dies einen Kopplungseffekt zur Folge, d.h. dass beide Scheiben an der Lastabtragung beteiligt sind. Die Dichte des SZR beträgt heutzutage üblicherweise 14 oder 16 mm [5], [6], [14].

¹ thermische Zusammenspiel von Glasscheibe, Fensterrahmen und Abstandhalter mit geringer Wärmeleitfähigkeit im Randverbund bei MIG [55]

2.2 Aufbau von Isoliergläsern

2.2.1 Scheibenaufbau

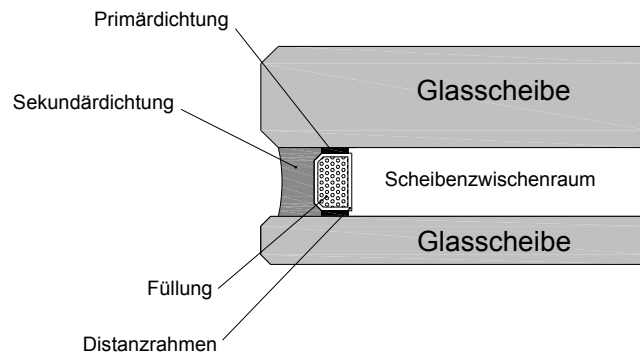


Bild 7: Aufbau MIG [6, Bild 4.4]

2.2.2 Lagerung

Die Linienlagerung gilt als häufigste und einfachste Art der Lagerung von Glasscheiben. Hierfür gelten die Technischen Regeln für linienförmig gelagerte Verglasung (TRLV) [8]². In den meisten Fällen wird statisch gesehen eine freie Verdrehbarkeit angenommen. Die Scheibe wird kontinuierlich auf Vorlegebändern oder Elastomerstreifen gelagert. Dadurch lassen sich kleinere Unebenheiten ausgeglichen und Spannungsspitzen sowie der direkte Kontakt bei einer metallischen Unterkonstruktion vermeiden [15].

Folgende drei³ Möglichkeiten gibt es:

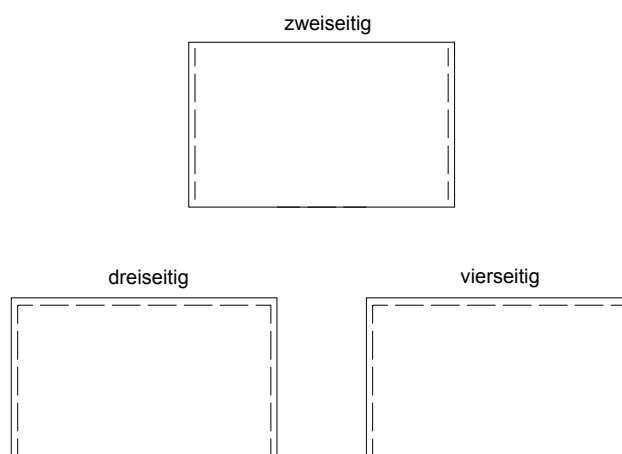


Bild 8: Linienförmige Lagerungen [15, Bild 5.1]

² Es existieren auch punktgelagerte MIG. Dies wird beispielsweise von der Firma SWISSWALL® angeboten.

³ einseitige Lagerung ist in TRLV nicht geregelt

2.2.3 Klotzung

Die Verklotzung (Hartholz oder Kunststoff) dient dazu, das Eigengewicht der Scheibe unmittelbar abzutragen und den Rahmen durch die Scheibe zu stabilisieren. Man unterscheidet Trage- und Distanzklötze (elastisch). Dort wo keine ebene Auflage vorhanden ist, werden zusätzlich Klotzbrücken verwendet.

Die Verklotzungen sollten etwa 80-100 mm lang und 2 mm breiter als das Glas sein und zwischen 100 und 250 mm vom Glasrand eingeschoben werden. Die Klötze lagern die Scheibe zwängungsfrei und gewährleisten die Gangbarkeit des Flügels, indem sie ein Verkanten oder Verwinden verhindern.

Die Anordnung der Klötze wird durch die Art sowie Form des Fensterelementes und der daraus resultierenden Beanspruchungen bestimmt (Dreh-, Klapp-, Wende­flügel, etc.) [17].

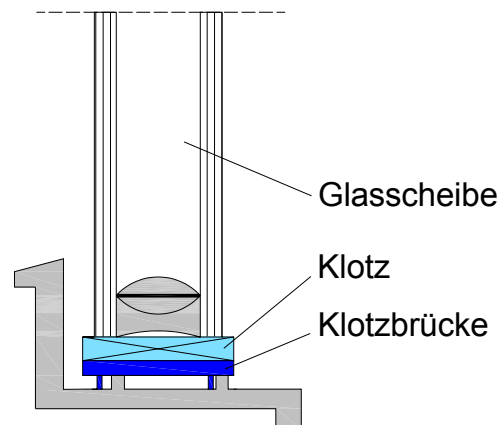


Bild 9: Verklotzung von Isolierglas [17]

Beispiel: feststehende Verglasung

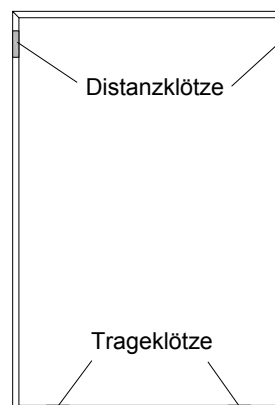


Bild 10: Zwängungsarme Lagerung in Scheibenebene [17]

2.3 Einteilung der Isoliergläser

Je nach Einsatzort und der daraus folgenden Anforderungen werden Isoliergläser mit verschiedenen Eigenschaften hergestellt und unterteilt.

2.3.1 physikalischen Eigenschaften

Neben Aufgaben, wie der Schließung von Gebäudeöffnungen, müssen Glasscheiben heutzutage noch wesentliche bauphysikalische Anforderungen erfüllen.

Wärmeschutz

Die Wärmedämmeigenschaft bei Isolierglas wird maßgeblich vom SZR und seiner Füllung beeinflusst. Durch Befüllung mit Gasen, die eine geringe Wärmeleitung besitzen haben (z.B. Argon, Krypton, Xenon), wird der Wärmetransport λ reduziert. Der Energietransport kann durch eine Teilung des SZR noch mehr reduziert werden, da dadurch die Konvektion⁴ unterbrochen wird. Durch Verwendung von transparenten Schichten auf mindestens einer der Scheiben, kann der u-Wert deutlich verbessert werden. Durch die Verwendung solcher Verglasung reduziert man Wärmeverluste im Winter stark. Bei einem u-Wert von etwa 2 W/m²K wird der Zustand am Fenster als angenehm empfunden. Außerdem wird durch die hohe Transparenz zusätzlich (passiv) Wärme gewonnen [14], [16].

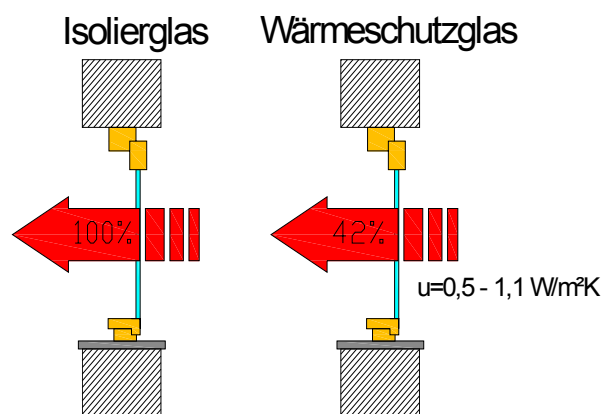


Bild 11: Unterschied zwischen Isolier- und Wärmeschutzverglasung [13]

⁴ Energietransport in einem gasförmigen Medium

Sonnenschutz

Anders als bei der Wärmeschutzverglasung soll der Sonnenschutz dafür sorgen, dass so wenig wie möglich Sonnenenergie ins Innere des Gebäudes gelangt. Der Lichttransmissionsgrad soll jedoch so hoch wie möglich sein, damit ausreichend Licht ins Innere gelangt [14]. Die Strahlen werden entweder durch Beschichtungen mit dünnen metallischen Folien (Aluminium, Silber, Gold) reflektiert oder absorbiert, indem die Gase mit Metalloxiden eingefärbt werden.

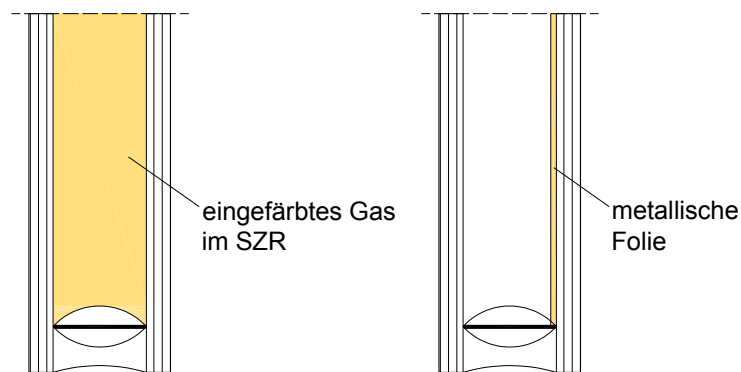


Bild 12: Möglichkeiten für die konstruktive Ausbildung des Sonnenschutzes [14]

Man sollte bei Sonnen- und Wärmeschutzverglasungen auf die Verwendung von kleinen Abmaßen mit großem SZR verzichten, da diese sich stärker erwärmen als normale Isoliergläser. Dadurch vergrößert sich das Volumen der Gase, was zu einer Steigerung der klimatischen Belastung führt [15, Kap. 2.3.7].

Schallschutz

Um das richtige Schalldämmverhalten zu erreichen, sind einige Faktoren zu berücksichtigen. Ändert sich z.B. der SZR durch seine Größe, Schwankung des Luftdrucks oder Temperatureinflüsse, so ändert sich auch das Dämmverhalten [14]. Auf der anderen Seite spielt das Flächengewicht eine wichtige Rolle. Je dicker die Scheibe, desto höher die Dämmwirkung [15, Kap. 2.3.7]. Zusammen wirken SZR und Scheibendicke als schwingendes Masse-Feder-Masse-System, welches eine Eigenfrequenz und somit eine Schalldämmung hat. Die hierfür maßgebliche Konstellation wird in Versuchsreihen bestimmt.

Die Verglasung und der Fensterrahmen müssen individuell auf den Schallpegel abgestimmt werden und konstruktiv gut ausgebildet sein, damit eine ausreichende Schalldämmung gewährleistet ist [14], [15].

Zur Verbesserung des Schallschutzes ist die Verwendung von Verbundglasscheiben mit speziellem Gießharz möglich. Die Zwischenschicht ist elastisch und dämpft somit die Schallwellen im Inneren. Die äußere Scheibe sollte stets dicker als die innere Scheibe sein. Hierdurch vermindert sich der Einfluss der Eigenfrequenz und die Koinzidenzeinbrüche⁵ verschieben sich zu unterschiedlichen Frequenzen [18].

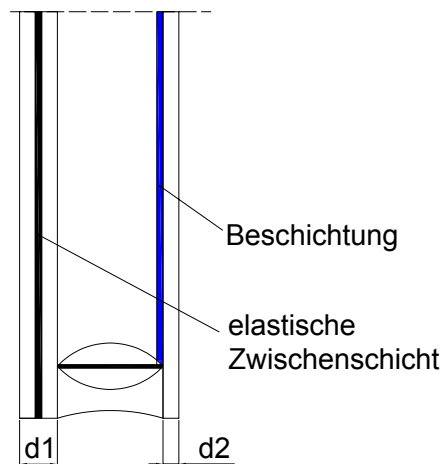


Bild 13: Aufbau einer Schallschutzverglasung [14]

Sicherheitsanforderung

Neben dem Schutz vor Wärme und Sonne, können Isolierverglasungen auch zusätzlich als Sicherheitsschutz dienen. Bei solchen Varianten werden eine oder beide Floatglasscheiben durch ESG⁶ oder VSG⁷ ersetzt.

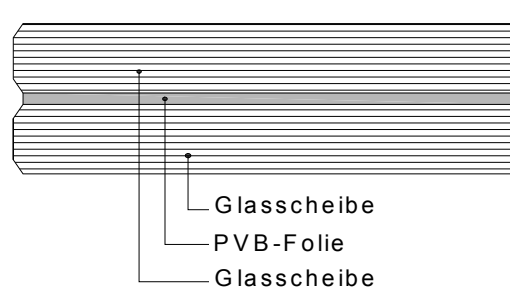


Bild 14: Aufbau einer VSG-Scheibe [15]

⁵ Koinzidenzeinbruch - deutliche Abnahme der Schalldämmung in einem bestimmten Frequenzbereich

⁶ ESG – Einscheiben-Sicherheitsglas (gehärtete Scheiben, zerbrechen in kleine Würfel)

⁷ VSG – Verbundscheiben-Sicherheitsglas (min. 2 Scheiben, durch eine PVB-Folie verbunden)

2.3.2 Fertigung und Aufbau

Anhand der Herstellung und der Ausführung kann man Isoliergläser ebenfalls einteilen. Nachfolgend werden drei Varianten unterschieden [16].

Ganzglas-Isolierglas

Hier werden zwei Scheiben im Randbereich erhitzt und anschließend abgekröpft⁸, so dass sie miteinander verschmelzen. Der SZR wird anschließend mit Gas oder Luft gefüllt. Die Öffnungen werden am Rand verschlossen.

Gelötetes Isolierglas

Auch bekannt als „Thermopane“. Die Scheiben werden im Randbereich verkupfert und anschließend mit einem Bleisteg verlötet.

Isolierglas mit organisch geklebtem Randverbund

Die Herstellung erfolgt als Ein- oder Zweistufensystem.

a) eine Dichtstufe:

Der Abstandsrahmen ist perforiert⁹ und besteht aus Aluminium oder verzinktem Stahl. Er ist im Glasscheibenbereich dicht verklebt sowie mit einem Trockenmittel gefüllt.

b) zwei Dichtstufen:

Dies ist die moderne Ausführung und wird heute standardmäßig eingesetzt. Bei der ersten Dichtstufe wird ebenfalls ein Rahmen aus Metall mit Trockenmittel eingesetzt. Danach wird als zweite Stufe der Hohlraum außerhalb des Rahmens mit dauerelastischem Dicht- und Klebstoff (Polysulfid, -urethan oder Silikon) gefüllt.

⁸ kröpfen - doppelwinklig abbiegen

⁹ perforieren - lochen

2.3.3 Randverbund

Die dritte Möglichkeit Isoliergläser zu unterscheiden, ist die Einteilung nach der Ausbildung des Randverbundes [14].

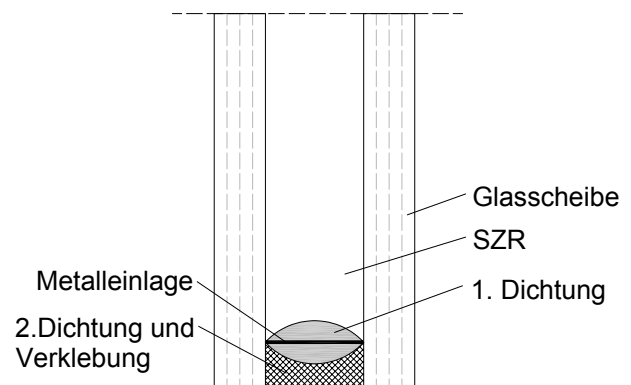
Ganzglasrandverbund

Die Kanten der Scheibe werden in einem Abstand zueinander verschweißt und der SZR (0,2 mm ausreichend) wird mit trockener Luft befüllt. Dies hat einen starren Randverbund zur Folge. Der Ganzglasrandverbund war früher eine übliche Variante, die heute bei Vakuum-Isoliergläsern wieder eine Rolle spielt.

Butylrandverbund

a) mit Aussteifung

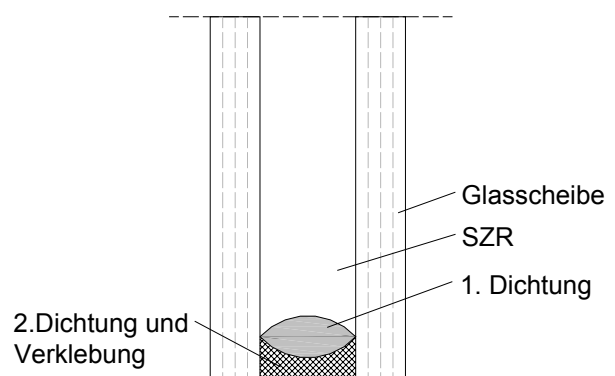
Als Aussteifung dient hier ein dünnes Metallband und kein Rohr. Es nimmt die Feuchtigkeit über einen Butyldichtstoff mit Absorptionsmaterial auf. Ein weiterer Dichtstoff dient zur mechanischen Festigkeit.



*Bild 15: Butylrandverbund mit Aussteifung
[14, Bild 2.1.36]*

b) ohne Aussteifung

Hier wird das Butyl in den Randbereich heiß eingespritzt und anschließend wird die zweite Dampfsperre aufgebracht. Die mechanische Festigkeit wird von einem Dichtstoff alleine erbracht.



*Bild 16: Butylrandverbund ohne Aussteifung
[14, Bild 2.1.37]*

3 Lastannahmen für Glasscheiben

Um die richtige Auswahl der Glasscheibendicke zu treffen, ist es wichtig zu wissen, welche Lasten auf ein Bauwerk einwirken. Nachfolgend werden die Lasten, die im Normalfall auf eine Vertikal- oder Horizontalverglasung einwirken, erläutert. Sonderlasten, wie Anprall für absturzsichernde Verglasung oder Personenlasten für begehbare Verglasung werden nicht mit einbezogen.

3.1 Eigenlast

In der modernen Architektur haben großzügige Verglasungen aus gestalterischen und energetischen Gesichtspunkten heraus eine große Bedeutung erlangt. Dabei werden immer häufiger große Spannweiten erreicht, was das Eigengewicht der Scheiben entsprechend erhöht [9].

Das Eigengewicht wirkt als ständige Flächenlast lotrecht zur Erdoberfläche. Sie ist in der DIN 1055-1 [1] geregelt.

3.2 Schnee

Die Schneelast ist als veränderliche Last definiert. Sie wirkt lotrecht zur Erdoberfläche und wird außerhalb von Verwehungszonen als konstante Flächenlast erfasst, die etwa 30 - 40 Tage einwirkt („Mittlere Andauer“). Schnee ist eine maßgebende Einflussgröße zur Ermittlung der Glasdicke bei Überkopfverglasungen. Ermittelt wird die charakteristische Last nach der aktuellen Norm für Schnee- und Eislasten nach DIN 1055-5:2005-07 [3], [5], [9].

Charakteristischer Wert S_k

Die charakteristische Schneelast, ist die Berechnung des charakteristischen Wertes s_k , die unmittelbar auf die Erdoberfläche wirkt. Dieser wird von der Geländehöhe über NN und der jeweiligen Schneelastzone bestimmt. Es gibt insgesamt fünf Zonen (1; 1a; 2; 2a; 3), wobei die Zone 3 die höchste Stufe ist.

Berechnet wird s_k wie folgt:

Zone	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden in kN/m ²
1	$s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \geq 0,65$
1a	$s_k = 1,25 \cdot \left[0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \right] \geq 0,81$
2	$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \geq 0,85$
2a	$s_k = 1,25 \cdot \left[0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \right] \geq 1,06$
3	$s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \geq 1,10$

A.... Höhe über NN

Tab. 2: Charakteristische Werte der Schneelast auf dem Boden [8, Tafel 3.35]

Schneelast S_i auf dem Dach

Die Ermittlung der Schneelast ist nicht nur von der Schneelastzone und der Geländehöhe abhängig. Auch die Dachform und –neigung spielen eine erhebliche Rolle. Sie werden in dem Formbeiwert μ_i berücksichtigt.

$$s_i = \mu_i \cdot s_k \quad \text{in [kN/m}^2\text{]}$$

Für die Berechnung wird unterschieden in flache und geneigte Dächer (Flach- und Pultdächer, Satteldächer, Sheddächer), Tonnendächer, Höhengsprünge an Dächern und Verwehungen an Wänden und Aufbauten [3].

Für Vordächer und Höhengsprünge sollte man außerdem berücksichtigen, dass durch herabstürzende Schneemassen eine zusätzliche Belastung entstehen kann. Deshalb sollten bei der Planung Schneefanggitter berücksichtigt werden. Herabfallender Schnee stellen bei Überkopfverglasungen ein rechnerisch schwer zu erfassendes Bemessungssituation dar.

Beispiel: Schneelast auf einem Pultdach

Bauwerksstandort: Dresden; Höhe = 113 m ü. NN

Dachneigung: $\alpha = 30^\circ$

Schneelastzone 2

$$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{113 + 140}{760} \right)^2 = 0,46 \leq 0,85$$

Schnee auf dem Dach:

$$\mu_i = 0,8$$

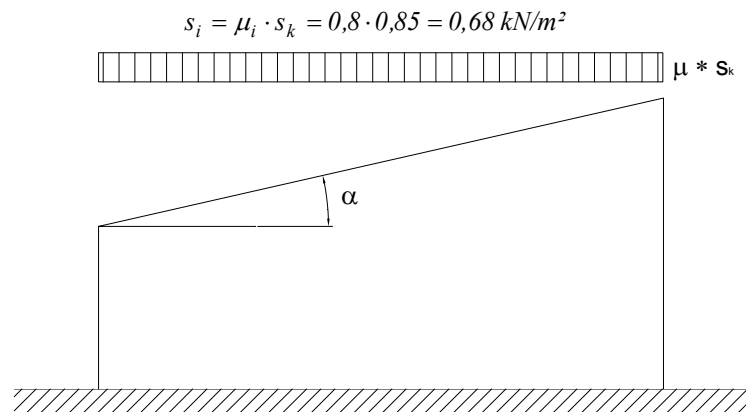


Bild 17: Lastbild der Schneelast für flache und einseitig geneigte Dächer [3, Bild 4]

3.3 Wind

Der Wind ist eine veränderliche, frei einwirkende Last. Sie wird als Druck- oder Sogkraft erfasst werden. Ermittelt wird die charakteristische Last nach der aktuellen Norm DIN 1055-4:2005-03 [2]. Wind wirkt immer senkrecht zur Oberfläche.

Geschwindigkeitsdruck q_{ref}

Um die angreifenden Windkräfte zu bestimmen, muss zuerst ein Geschwindigkeitsdruck ermittelt werden. Dieser ist von den jeweiligen vier Windzonen abhängig.

Windzone	v_{ref} [m/s]	q_{ref} [kN/m ²]
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Tab. 3: Windzonen, [2, Bild A.1]

Weiterhin muss der Standort in einer der vier Geländekategorien zugeordnet werden. Diese geben den Grad der Bebauung wieder und unterscheiden offenes See/ Flachland (I) bis zum stark bebauten Stadtgebiet mit Gebäuden über 15 Meter.

Höhenabhängiger Böengeschwindigkeitsdruck $q_{(z)}$

Mittels der Geländekategorie und dem Geschwindigkeitsdruck kann nun für die jeweilige Gebäudehöhe der Böengeschwindigkeitsdruck berechnet werden. Die Formeln sind in verschiedene Höhenbereiche unterteilt und in DIN 1055-4 tabellarisch aufgeführt.

Binnenland (Mischprofil der Geländekategorie II und III)		
$q_{(z)} = 1,5 \cdot q_{ref}$	für $z \leq 7m$	(10)
$q_{(z)} = 1,7 \cdot q_{ref} \cdot (z / 10)^{0,37}$	für $7m < z \leq 50m$	(11)
$q_{(z)} = 2,1 \cdot q_{ref} \cdot (z / 10)^{0,24}$	für $50m < z \leq 300m$	(12)

Tab. 4: Böengeschwindigkeitsdruck für Bauwerke über 25 m sowie im Regelfall [2]

Glasscheiben gelten in ihrer Konstruktion als nicht schwingungsanfällig. Da die Windlasten von den Größen der Flächen, auf die sie einwirken abhängig sind, muss zusätzlich noch ein aerodynamischer Beiwert berücksichtigt werden.

Außendruckbeiwerte c_{pe}

Diese Werte sind von der Lasteinzugsfläche A abhängig und werden für vertikale Wände, Flach-, Pult-, Sattel-, Trog- und Walmdächer für $A \leq 1 \text{ m}^2$ und $A \geq 10 \text{ m}^2$ und frei stehende Dächer aufgeführt [2, Tab. 3-8].

Für Scheiben, die eine Fläche $1 \text{ m}^2 \leq A \leq 10 \text{ m}^2$ haben, muss dieser wie folgt ermittelt werden.

$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot \lg A \quad [2, \text{Abschnitt 12.1.1, Gl. 18}]$$

Sonderfall Technische Baubestimmungen:

Die Windlastannahmen für Vordächer sind in DIN 1055-4 [2] nicht geregelt. Hierfür muss die „Liste der eingeführten Technischen Baubestimmungen“ [4] hinzugezogen werden. Im Teil III befindet sich die Anlage 1.1/1, in der die Vorgehensweise und die Beiwerte tabelliert sind.

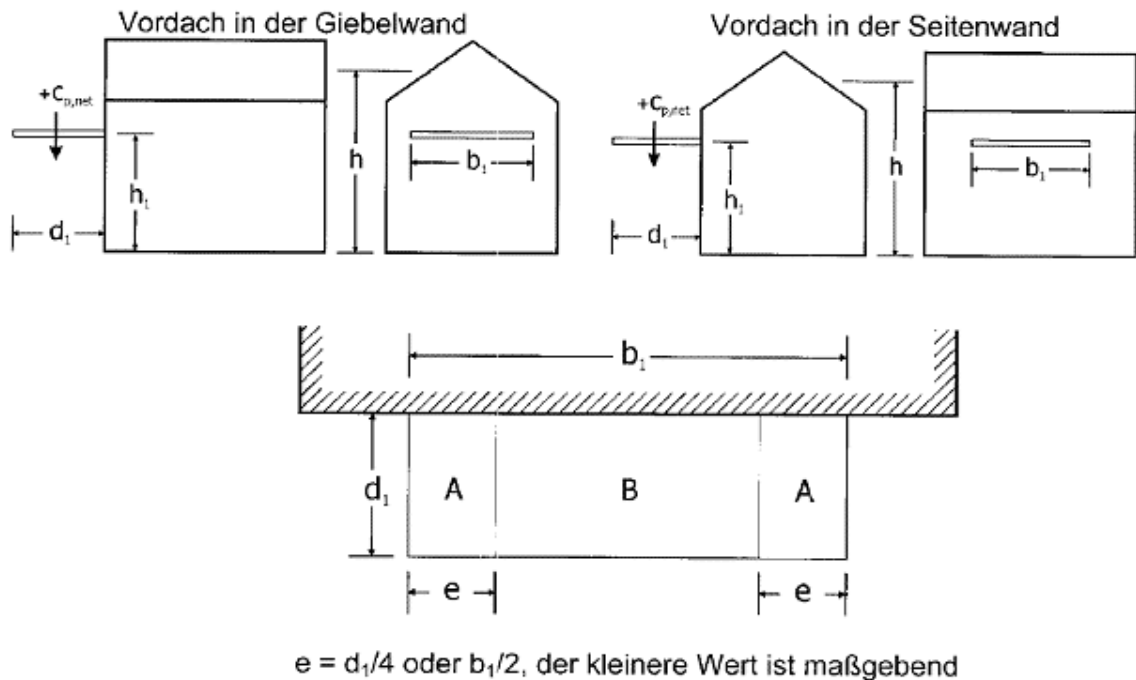


Bild 18: Abmessung und Einteilung der Flächen für Vordächer [4, Bild 1]

Höhen- verhältnis h_1/h	Bereich					
	Abwärtslast	A		Abwärtslast	B	
		Aufwärtslast $h_1/d_1 \leq 1,0$	Aufwärtslast $h_1/d_1 \geq 3,5$		Aufwärtslast $h_1/d_1 \leq 1,0$	Aufwärtslast $h_1/d_1 \geq 3,5$
$\leq 0,1$	1,1	-0,9	-1,4	0,9	-0,2	-0,5
0,2	0,8	-0,9	-1,4	0,5	-0,2	-0,5
0,3	0,7	-0,9	-1,4	0,4	-0,2	-0,5
0,4	0,7	-1,0	-1,5	0,3	-0,2	-0,5
0,5	0,7	-1,0	-1,5	0,3	-0,2	-0,5
0,6	0,7	-1,1	-1,6	0,3	-0,4	-0,7
0,7	0,7	-1,2	-1,7	0,3	-0,7	-1,0
0,8	0,7	-1,4	-1,9	0,3	-1,0	-1,3
0,9	0,7	-1,7	-2,2	0,3	-1,3	-1,6
1,0	0,7	-2,0	-2,5	0,3	-1,6	-1,9

Für Zwischenwerte $1,0 < h_1/d_1 < 3,5$ ist linear zu interpolieren, Zwischenwerte h_1/h dürfen linear interpoliert werden.

Tab. 5: Aerodynamische Beiwerte $c_{pe,net}$ für den resultierenden Druck an Vordächern [4, Tab. 1]

3.4 Klima

Bei der Berechnung von Mehrscheiben-Isolierglas müssen neben den regulären Lastannahmen, die aus Eigengewicht, Schnee und Wind resultieren, die klimatischen Belastungen berücksichtigt werden. Diese entstehen einerseits aus der Änderung des atmosphärischen Luftdrucks, welcher durch die Höhendifferenz zwischen Einbau- und Produktionsort sowie aus klimatischen Schwankungen. Andererseits werden dieser aus der Temperaturänderung des Gases im Scheibenzwischenraum hervorgerufen. Die Höhe der Belastung ist dabei abhängig vom Aufbau und vom Format der Scheibe. Ungünstig wirken sich dabei ein großer SZR, eine große Scheibendicke, ein unsymmetrischer Aufbau sowie kleine oder schmale Formate aus. Die klimatische Einwirkung wirkt immer als Fläche senkrecht zur Glasscheiben [5], [6].

P_i = Innendruck

P_a = Außendruck

T_i = Innentemperatur

T_a = Außentemperatur

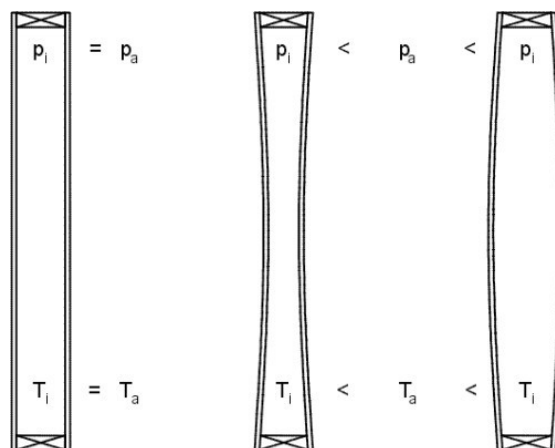


Bild 19: Verformungen durch Änderung des Luftdrucks und der Temperatur [10, Bild 1]

Die theoretische Last, die durch die Klimaeinflüsse im Scheibenzwischenraum (SZR) erreicht wird, ist formelmäßig als isochore Druck p_0 erfasst [6]. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen dem Zeitpunkt der Abdichtung des SZR und des Einbaues, bei gleich bleibendem Volumen. Diese Belastung ist stark von der Nachgiebigkeit der Scheiben abhängig, je größer die Scheibe, desto größer die Verformung und desto kleiner die klimatische Zwängung. Kleinformatige Scheiben weisen eine kleine Nachgiebigkeit auf, womit die Beanspruchungen sehr groß sind [11], [15].

isochorer Druck:

$$p_0 = c_1 \cdot \Delta T - \Delta p_{\text{met}} + c_2 \cdot \Delta H \quad \Delta T = \text{Temperaturdifferenz}$$

$$c_1 = 0,34 \text{ kPa/K} \quad \Delta p_{\text{met}} = \text{Schwankung des atmosphärischen Drucks}$$

$$c_2 = 0,012 \text{ kPa/m} \quad \Delta H = \text{Höhendifferenz}$$

Für die in der Formel verwendeten Größen, bieten die *Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV)* bestimmte Werte an.

Einwirkungs-kombination	ΔT [K]	Δp_{met} [kN/m ²]	ΔH [m]	p_0 [kN/m ²]
Sommer	+20	-2	+600	+16
Winter	-25	+4	-300	-16

Tab. 6: Rechenwerte für klimatische Einwirkungen und den resultierenden isochoren Druck p_0 [8, Tab. 1]

3.5 Lastkombination

Nach DIN 1055-100 [9, Anhang A, Bemessungsregeln für Hochbauten] werden die angreifenden Lasten mit Teilsicherheitsbeiwerten belegt und miteinander kombiniert.

Grundkombination: für alle veränderlichen Lasten, die ungünstig wirken, gilt:

$$E_d = \gamma_G \cdot E_{Gk} + 1,50 \cdot E_{Q, \text{unf}} + E_{Pk} \quad (A.5)$$

$$E_{Q, \text{unf}} = E_{Qk, 1} + \psi_{0, Q} \cdot \sum_{i > 1, \text{unf}} E_{Qk, i} \quad (A.1)$$

E_d ...Bemessungswert einer Beanspruchung

E_{Gk} ...Charakteristischer Wert einer Beanspruchung

$E_{Q, \text{unf}}$...unabhängigen veränderlichen Beanspruchung

E_{Pk} ...Beanspruchung durch Vorspannung

$E_{Qk, i}$...unabhängige veränderliche Beanspruchung

$\psi_{0, Q}$...Teilsicherheitsbeiwert für mehrere unabhängige veränderliche Beanspruchungen

γ_G ...Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Beanspruchung

4 Baurechtliche Grundlagen

Glaskonstruktionen kommen heutzutage immer mehr im Bauwesen zur Geltung, wo diese oftmals lastabtragende und aussteifende Funktionen übernehmen. Weil es noch keine ausführlichen Regelungen dafür gibt, müssen die Nachweise für die Konformität und der Verwendbarkeit durch Zustimmungen und Zulassungen erbracht werden [6, 2.1]. Durch das Baurecht werden verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung gestellt, erforderliche Nachweise für bauliche Anlagen¹⁰ zu führen [16, 9.1]. Bauprodukte¹¹ sind in geregelten, nicht geregelten und sonstige Bereiche eingeteilt. Gibt es keine technischen Baubestimmungen nach Bauregellisten, Liste der Technischen Baubestimmungen oder weichen sie von den Technischen Regeln ab, so gelten sie als nicht geregelt [25].

4.1 Genehmigungsverfahren

4.1.1 Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (AbP)

Das AbP wird von einer Prüfstelle nach § 19 Musterbauordnung (MBO) für Produkte und Bauarten, die in den nicht geregelten Bereich fallen und nicht bei besonders hohen Sicherheitsanforderungen eingesetzt werden, ausgestellt [22]. Die Bewertung erfolgt durch allgemein anerkannte Prüfverfahren, wie z.B. dem Pendelschlagversuch. In Einzelfällen greift man auch auf vorhandene Versuchsergebnisse zurück, welche durch das AbP erteilt wurden.

Zum Beispiel gilt eine vorgefertigte absturzsichernde Verglasung nach den „*Technischen Regeln für absturzsichernde Verglasung*“ (TRAV) als nicht geregelte Bauart und ist durch das AbP nachgewiesen. Falls die konstruktiven Randbedingungen abweichen, muss der Nachweis der Tragfähigkeit experimentell erbracht werden. Dies erfolgt über eine stoßartige Einwirkung auf die Scheibe.

Die abP ist fünf Jahre gültig, in diesem Zeitraum kann der Hersteller für gleichartige Verglasung ebenfalls die notwendigen Nachweise für die Verwendbarkeit erbringen. Dies erfolgt über eine Übereinstimmungserklärung, dass das Produkt den TRAV und den Vorgaben des abP entspricht [6].

¹⁰ bauliche Anlagen – siehe 4.3.1 Musterbauordnung

¹¹ Bauprodukt – siehe 4.3.1 Musterbauordnung

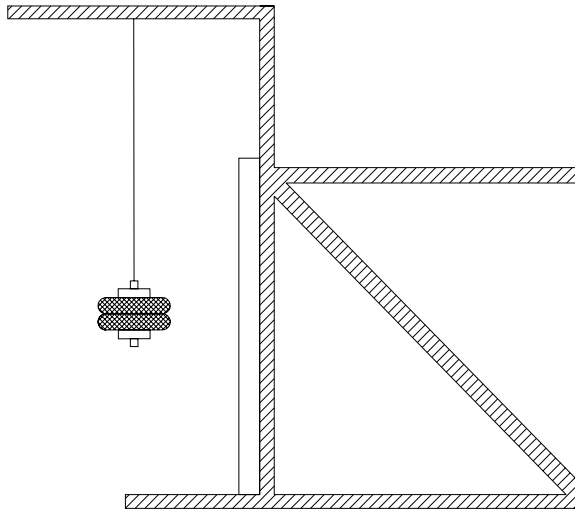


Bild 20: Pendelschlagversuch [23]

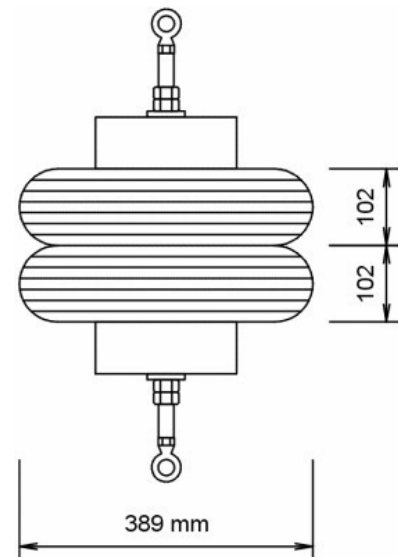


Bild 21: Doppelreifen-Pendelkörper nach DIN EN 12600 [10]



Bild 22: Pendelschlagversuch [10]

4.1.2 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ)

Nach § 18 MBO werden durch das DIBt in Berlin Bauprodukte oder –arten zugelassen, die weder in einer Norm noch in den allgemein anerkannten Regeln der Technik berücksichtigt werden oder von ihnen abweichen [22]. Die AbZ sind zuverlässige Verwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte [20]. Ein Sachverständigenausschuss (SVA) beurteilt die jeweiligen Produkte anhand von Gutachten und experimentellen Untersuchungsergebnissen, welche der Hersteller vorlegen muss. Sie regeln die Bemessung, Herstellung, Montage, Wartung und beschreiben den Anwendungsbereich. Die sachverständigen Stellen, die Gutachten erstellen und die Prüfungen durchführen, bestimmt das DIBt. Im Glasbau wird z.B. der Einsatz von teilvorgespannten Gläsern (TVG) als Bauprodukt und Vordachsysteme als Bauart durch die AbZ geregelt. Fünf Jahre ist die Zulassung im Regelfall gültig und die Kosten trägt der Antragssteller; danach kann eine Verlängerung beantragt werden [6].

Ablauf:

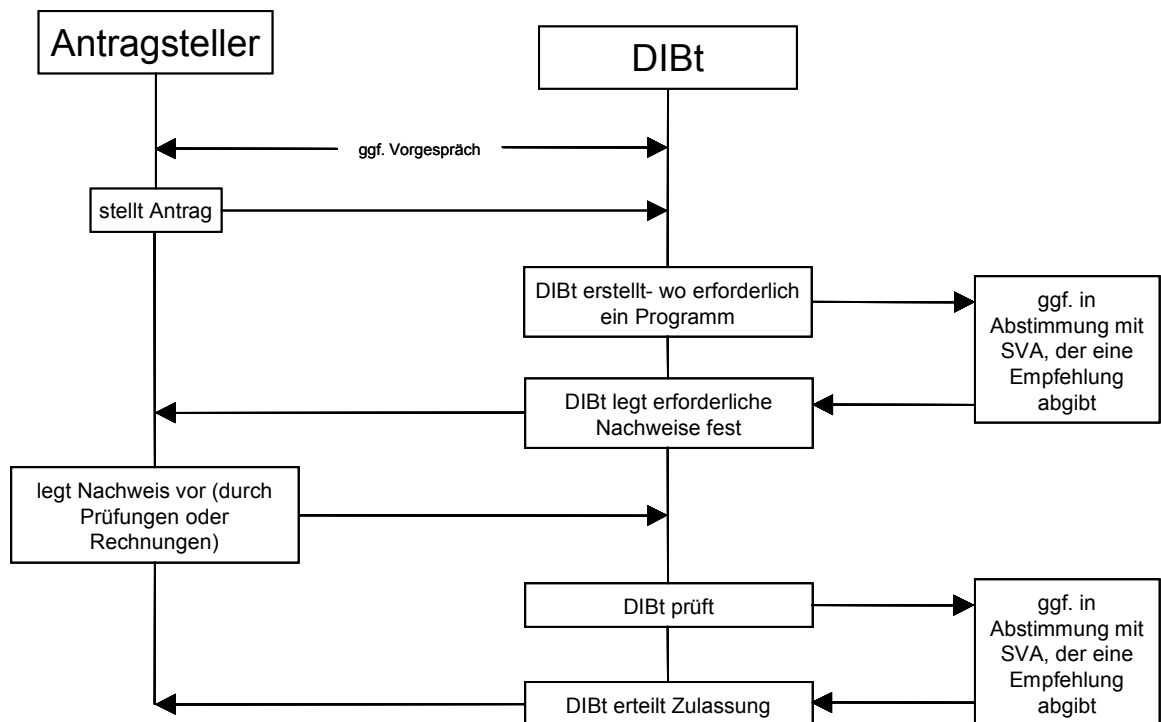


Bild 23: Ablauf zur Erlangung einer abZ [21, Ablaufdiagramm]

4.1.3 Europäische Technische Zulassung (European Technical Approval, ETA)

In Europa erfolgt der Nachweis der Brauchbarkeit eines Bauproduktes für den nicht geregelten Bereich über die ETA. In Deutschland wird sie vom DIBt erteilt. Die Mitgliedsstaaten haben die Verantwortung darüber, dass die Bauprodukt und -arten richtig bemessen und eingesetzt werden, da sich eine ETA ausschließlich auf die Spezifikation eines Produktes beschränkt. Dadurch kann das Sicherheitsniveau national unterschiedlich ausfallen. Die Zulassungen sind in der gesamten EU und den Vertragsstaaten des Europäischen Wirtschaftsraumes fünf Jahre gültig. Sie ermöglicht dem Hersteller die CE-Kennzeichnung¹² und somit den Zugang für den europäischen Markt [6], [21].

Ablauf:

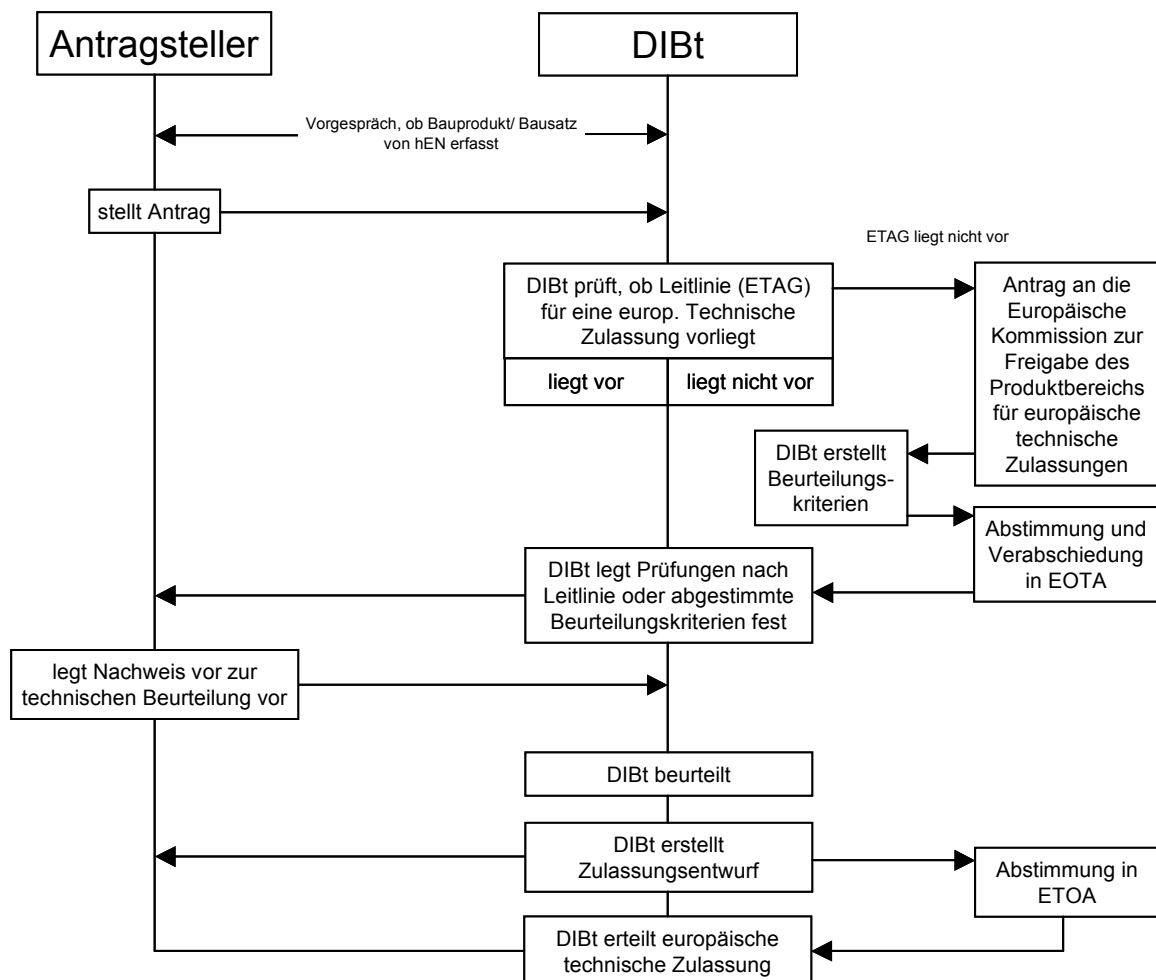


Bild 24: Ablauf zur Erlangung einer ETA [21, Ablaufdiagramm]

¹² CE-Kennzeichnung (Conformité Européenne) - Produkt ist zugelassen durch die vorgeschriebenen Nachweisverfahren im Zusammenhang mit der Produktsicherheit und entspricht den europäischen Richtlinien [23]

4.1.4 Zustimmung im Einzelfall (ZiE)

Wenn für nicht geregelte Bauprodukte oder Bauarten keine abZ, abP oder ETA vorliegt, ist als Nachweis für die Verwendbarkeit dieser Produkte eine ZiE notwendig. Auf Antrag des Bauherrn [22, § 20] erfolgt die Erteilung über die Obersten Bauaufsichtsbehörde (OBB) der Länder. In Sachsen ist dafür die Landesdirektion Leipzig – Landesstelle für Bautechnik zuständig. Die Aufgabe einer ZiE ist es, die Bedingungen bei der Herstellung und Verwendung eines Produktes festzulegen. Sie ersetzt aber nicht die erforderlichen bautechnischen Prüfungen und Baugenehmigungen. Die Prüfungen werden an Prüfkörpern durchgeführt, die den Originalbauteilen gleich sind - in Hinsicht auf Aufbau, Lagerung und weiteren Randbedingungen. Die Anzahl der Prüfungen legt die OBB fest. Die Kosten für die Durchführung trägt der Antragssteller. Eine ZiE ist auf eine konkrete Konstruktion beschränkt und ist nicht auf eine ähnliche Konstruktion übertragbar. Die Unterlagen lassen sich aber für eine neue ZiE als Vorlage verwenden. Bei Bauvorhaben, für die der Bund zuständig ist, erteilen die zuständigen Instanzen die ZiE. Das kostspielige und zeitaufwändige Verfahren lohnt sich vor allem bei größeren Bauvorhaben mit sich wiederholenden identischen Konstruktionselementen (z.B. Eisenbahnamt (EBA) zuständig für Bahnhofsbauten, Bundesverkehrsministerium (BMBV) zuständig für Bauten von Bundesstraßen) [5], [6], [25].

Ablauf:

Verfahrensschritte	Bearbeiter
Beschreibung des Antragsgegenstandes	→ Antragsteller
↓	
Bewertung und Beratung	→ Bauaufsichtlich anerkannte Prüfstelle
↓	
Antragstellung	→ Antragsteller
↓	
Rücksprache	→ OBB
↓	
Bauteilprüfung	→ Bauaufsichtlich anerkannte Prüfstelle
↓	
Gutachten	→ Gutachter
↓	
Zustimmung	→ OBB

Tab. 7: Ablauf des Verfahrens zur Erlangung einer ZiE

4.1.5 Übereinstimmungsnachweis

Laut MBO müssen Bauprodukte mit den technischen Regeln, den abP, den abZ oder den ZiE übereinstimmen. Die Bestätigung erfolgt über den Nachweis einer Übereinstimmungserklärung des Herstellers (§ 23) bei Produkten, die nicht in Serie gefertigt werden oder über ein Übereinstimmungszertifikat (§ 24). Diese Produkte werden mit dem Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) gekennzeichnet. [22, § 22].

4.2 Zustimmungspflichtige Bauteile

Für die nachfolgend aufgeführten Verglasungsarten gibt es derzeit keine Technischen Baubestimmungen; deshalb kann die Anwendung in den meisten Fällen nur über eine ZiE erfolgen.

4.2.1 Punktgelagerte Verglasung

Allgemein wird die Befestigung über Bohrungen in der Glasscheibe als Punkthalterung bezeichnet – sie übernimmt die tragende Funktion in der Glasebene. Im Fall von MIG erfolgt am freien Rand die Abdichtung somit sind Trag- und Dichtfunktion voneinander getrennt. Die Punktlagerung kann auch über die Kombination aus System mit tragendem Profil und durchgeschraubter Pressleiste und freien Rändern ausgebildet werden. So erhält man punktuelle Lagerungen am Rand mit zusätzlicher Auflage für die Verklotzung und Klemmtellerbefestigung. Diese Lager nehmen Beanspruchungen senkrecht sowie parallel zur Scheibenebene auf. Die Lagerung sollte durch feste und verschiebbliche Lager statisch bestimmt sein. An den freien Rändern muss somit nur noch die Dichtungsfunktion gewährleistet werden. Mittels der richtigen Anordnung von festen und verschiebblichen Lagern baut man die Scheiben in Scheibenebene zwängungsfrei ein (siehe Bild 19) [14], [10].

Beim Nachweis solcher Verglasungen bedarf es aufwändiger Berechnungen, die meist mit der Finiten-Element-Methode erfolgen. Im Bereich der Bohrungen treten in der Regel die maximalen Hauptzugspannungen auf. Spannungsspitzen müssen im Rechenmodell realistisch erfasst werden, um eine Überbeanspruchung und somit einen Glasbruch zu verhindern. Wegen der hohen Spannungskonzentration am Punkthalter ist vorgespanntes Glas zu verwenden [10].

Bemessung und Ausführung sowie die Nachweise der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von punktgelagerten Vertikal- und Überkopfverglasungen und deren Konstruktionen erfolgen nach den Technischen Regeln (TRPV), [33]. Entsprechen Glasbauteile nicht den Technischen Regeln, dem abP oder abZ, so ist eine ZiE erforderlich, wie z.B. punktgelagerte Verglasung der Kategorie A (siehe Abschnitt 4.3.6, Bild 36).

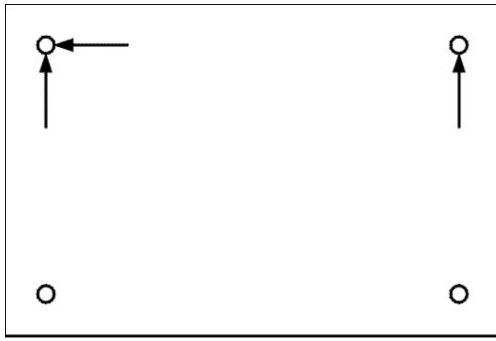


Bild 25: Lagerung punktgehaltener Verglasungen [10]

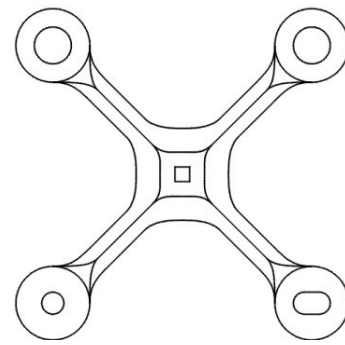


Bild 26: Haltekonstruktion zur punktförmigen Lagerung (Spider) [10]

Art	Typ	Glasart	Nachweise
Horizontalverglasung	Überkopfverglasung ¹³ (Neigung > 10°)	- VSG 2-lagig - PVB-Folie, 1,52 mm	- ZiE ¹⁴ , Nachweis der Resttragfähigkeit
	Begehbarer Verglasung (Einbauhöhe > 20 cm)	- VSG 3-lagig	- ZiE, Nachweis der Resttragfähigkeit und der Stoßsicherheit
Vertikalverglasung (nicht absturzsichernd)	Glaswand (> 4 m über Fußboden)	- VSG 2-lagig - ESG	- ZiE - ZiE, Heißlager- ungstest
Vertikalverglasung (absturzsichernd)	Glaswand (Kat. A nach TRAV)	- VSG 2-lagig aus ESG - PVB-Folie, 0,76 mm	- ZiE, Pendelschlagver- such
	Glaswand (Kat. C 3 nach TRAV)	- VSG 2-lagig	- ZiE, Pendelschlagver- such

Tab. 8: zustimmungspflichtige punktelagerte Glasbauteile [33]

¹³ Bei begehbaren Verglasungen muss ein zusätzliches Genehmigungsverfahren durchgeführt werden (siehe 4.2.3).

¹⁴ Bei Verwendung von Glas-Halter-Systemen mit abZ ist keine ZiE notwendig.

4.2.2 Structural-Glazing-Fassaden

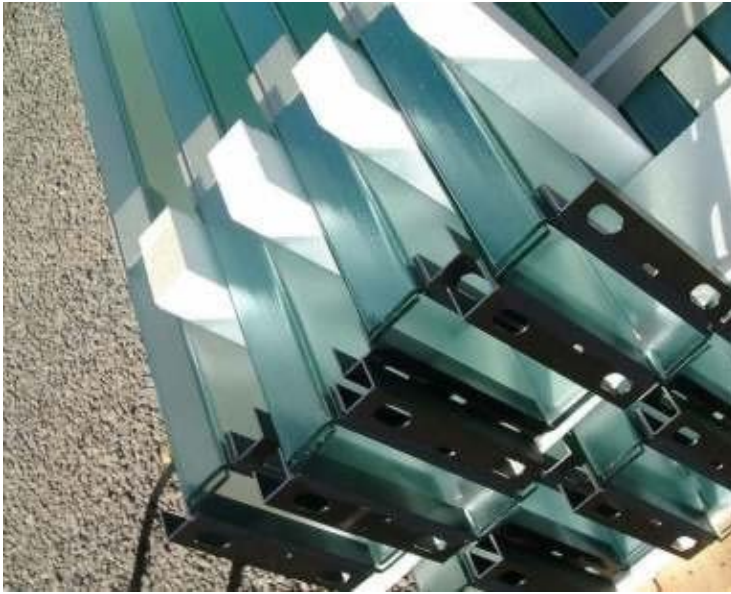


Bild 27: verklebten Profilgläser mittels Structural-Glazing-Silikon mit Aluminiumprofilen [10]



Bild 28: Structural-Glazing-Fassade [27]

Die Structural-Glazing-Fassaden¹⁵ sind eine architektonisch reizvolle Variante der Vorhangfassade. Bei dieser, aus den USA stammenden Verglasungstechnik werden die Scheiben direkt auf die Profile geklebt, so dass die üblichen Rahmen entfallen. Einige Systeme erlauben mit abZ in Deutschland eine Einbauhöhe von bis zu 100 m [15, 5.4.2]. So ergibt sich eine gleichmäßige, gebäudeumhüllende Glasfront, die eine Scheibenneigung von bis zu 20° zulässt. Die Fuge, die die Verbindung zwischen Glas und Profil schafft, besteht i.d.R aus UV-beständigen Zweikomponentensilikon, ist 15 mm breit und 5 mm stark und überträgt die Windlast. Die Verklebungen dürfen keiner Dauerbelastung ausgesetzt sein. Das Eigengewicht hingegen übertragen die Glasklötze direkt auf die Unterkonstruktion. In einer Einbauhöhe über 8 m müssen in Deutschland zusätzlich Soghalter montiert werden. Mittlerweile gibt es neue Ausführungen dieser Variante; die Scheibe wird durch eingeschobene Stahl- oder Aluminiumprofile gehalten - eine Verklebung entfällt (siehe Bild 30). SSG-Fassaden finden in Deutschland kaum Anwendung, da es in den AbZ zu viele Einschränkungen gibt [10], [15].

¹⁵ Auch Structural-Sealant-Glazing (Strukturelle Verglasung mit Dichtmittel) genannt.

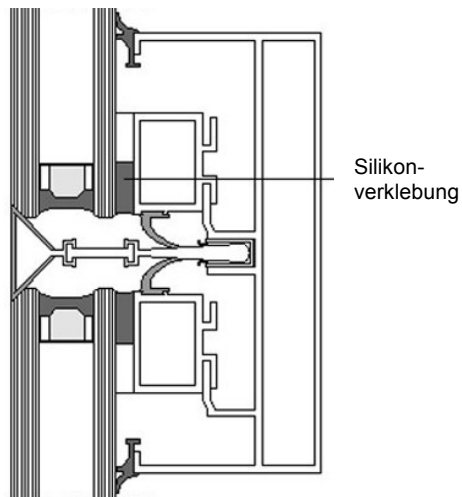


Bild 29: SSG mit mechanischer Sicherung der Außenscheibe [10]

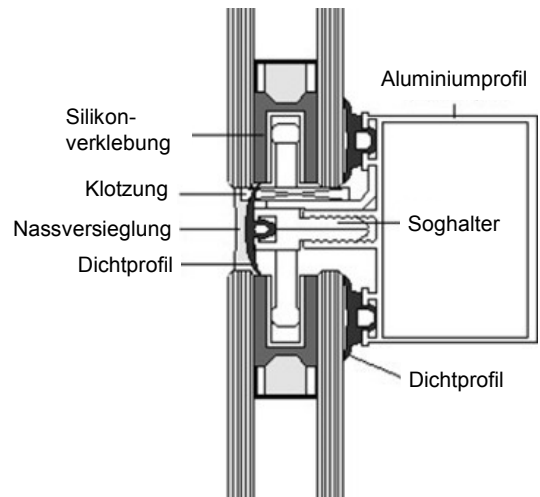


Bild 30: SSG mit eingeschobenen Profil ohne Verklebung [10]

4.2.3 Horizontalverglasung

Horizontalverglasung sind Überkopfverglasungen, die mindestens zweiseitig linienförmig gelagert sind und deren Neigung gegen die Vertikale $> 10^\circ$ beträgt. Einzelscheiben und die untere Scheibe von Isolierglas müssen aus Gründen der Resttragfähigkeit aus Drahtglas, VSG aus SPG oder VSG aus TVG sein. Die konstruktiven und rechnerischen Regeln sind der TRLV [8] zu entnehmen. Im Fall von Personenlasten ist die Verglasung in eine der beiden folgenden Verglasungsarten einzuordnen [10]:

Begehbare Überkopfverglasung

Dies sind Glasflächen, die im Innen- und Außenbereich als frei zugängliche Verkehrsflächen dienen, wie z.B. Treppen, Podeste, Laufstege. Sie müssen eine ausreichende Rutsicherheit bieten. Dazu kann die Oberfläche aufgeraut, geätzt, emailliert oder gelasert werden. Außerdem muss der Aufbau aus einer 3-fachen VSG-Scheibe erfolgen, wobei die oberste Glasschicht dem Verschleiß dient und nicht als tragend angesetzt werden darf. Die Verbundwirkung ist für den Nachweis der Standsicherheit zu vernachlässigen. Die Lagerung ist entweder allseitig oder punktförmig auszulegen. Die Nachweise für begehbare Verglasung erfolgen nach TRLV [8] und TRPV [33].



Bild 31 und 32: begehbare Verglasung [28],[29]

Abmaße und Aufbau:

Nach TRLV, 3.4.3 [8] beträgt die maximale Scheibengröße 1500 mm in der Länge und 400 mm in der Breite. Bohrungen sind wegen der Gefahr von unkalkulierbaren Glasbrüchen durch lokale Spannungskonzentrationen ungünstig. Deshalb [26, 2.4] dürfen gebohrte Scheiben aus nicht vorgespanntem Glas (SPG, Drahtglas) nur unter Vorlage von besonderen Nachweisen verwendet werden.

Der Glaseinstand ist mit mindestens 30 mm auszuführen und die Scheibe muss durch mechanische Halterungen gegen Abheben gesichert sein. Für die obere Schicht ist mindestens 10 mm ESG oder TVG (teilvorgespanntes Glas) anzuwenden. Die unteren zwei Schichten müssen aus mindestens 12 mm TVG oder SPG (Spiegelglas) bestehen. Für die verbindende Zwischenschichten kommt jeweils eine Polyvinylbutyral-Folie mit einer Mindestdicke von 1,52 mm zum Einsatz [8, 3.4.2].

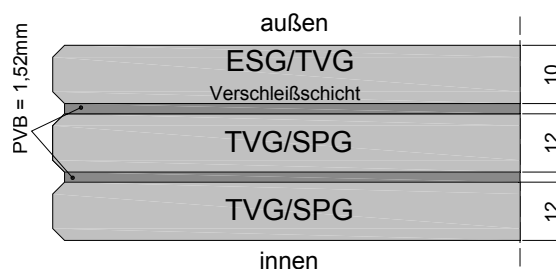


Bild 33: Aufbau einer begehbaren Glasscheibe (Angaben in mm)

Lasten und Nachweise:

Die Lasten aus Eigengewicht, Schnee, Wind und Verkehr werden für begehbarer Verglasung und deren Haltekonstruktion nach DIN 1055 [1-3] ermittelt. Zusätzlich ist nach TRLV die Lastfallkombination Eigengewicht + Einzellast zu berücksichtigen. Je nach Größe der gleichmäßigen Verkehrsflächenlast wirkt die resultierende Einzellast mit 1,5 bzw. 2,0 kN, auf 10 x 10 cm² [42].

Bei Treppen muss die Art der Unterkonstruktion eine ausreichende Lastverteilung gewährleisten. Die Durchbiegung ist unter der Bemessungslast auf $l/200$ zu begrenzen. Für den Fall, dass die oberste Schicht der VSG-Scheibe zerbricht, ist eine Durchbiegung von $l/100$ einzuhalten. [8, 3.4.2], [15].

Betretbare Überkopfverglasung

Wenn Überkopfverglasungen aus Reinigungs- und Wartungszwecken von Personen betreten werden, ist dieser Lastfall nach der DIN 4426 [30] zu untersuchen. Allgemein ist bei der Lastkombination davon auszugehen, dass nur vom Schnee bereits befreite Glasscheiben betreten werden. Entsprechen die Verglasungen nicht der TRLV [8], sind zusätzlich Versuche zum Nachweis der Resttragfähigkeit erforderlich.

Abmaße und Aufbau:

Die Verglasungen sind linienförmig zu lagern. Stützweiten über 1,20 m erfordern eine allseitige Lagerung. Dabei sollte das Seitenverhältnisse $\leq 3:1$ betragen. Bohrungen oder Aussparungen sowie gebogene Gläser sind nicht erlaubt [32]. Um die Verletzungsgefahr zu reduzieren sollte bei Isolierverglasungen die oberste Scheibe aus ESG oder VSG sein. Für die untere Scheibe ist aus Gründen der Resttragfähigkeit VSG aus TVG oder SPG vorzusehen. Dies gilt unabhängig von MIG. Sollte der Aufbau der Verglasung von der TRLV abweichen, so sind entsprechende Versuche notwendig, um die Resttragfähigkeit nachzuweisen.

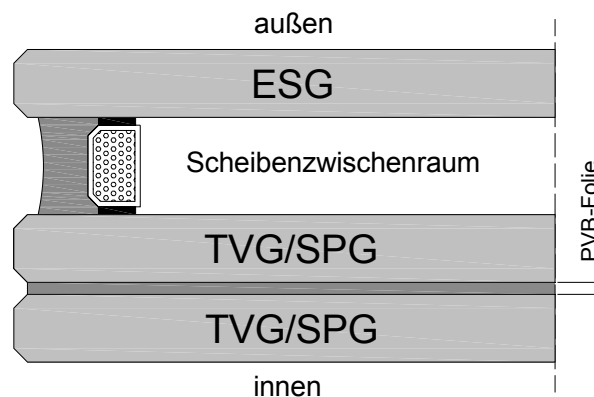


Bild 34: Aufbau einer betretbaren Isolierverglasung

Lasten:

Die Lastannahmen, für Eigengewicht, Schnee und Wind sind nach DIN 1055 [1-3] zu ermitteln. Die statischen Nachweise erfolgen gemäß TRLV [8]. Zusätzlich muss nach DIN 4426 [30] eine Personenlast von 1,5 kN berücksichtigt werden, die auf einer Fläche von 10 x 10 cm² wirkt. Auf die Überlagerung mit den anderen Lasten verzichtet man, wenn die Annahme gilt, dass nur vom Schnee befreite Glasscheiben betreten werden können [30]. In den Nutzungsvorschriften sind die getroffenen Lastannahmen zu dokumentieren.

Experimentell erfolgt der Nachweis der Tragfähigkeit an einer vorgeschädigten Scheibe, die zusätzlich durch Personen und einen Stoß belastet wird. Als Personenlast gilt die Annahme von 1 kN auf eine Fläche von 20 x 20 cm². Der Stoßkörper ist nach GS-Bau-18 [31] ein mit Glaskugeln gefüllter, 50 kg schwerer Sack, der aus einer Höhe von 1,20 m herunter fällt. Dies simuliert den Absturz der betretenden Person und eines Werkzeuges gleichermaßen. Der Nachweis der Resttragfähigkeit erfolgt an der durch den Stoß geschädigten Scheibe. Hierfür wird eine Personenlast von 1 kN mit einer Auflagefläche von 20 x 20 cm² simuliert, die 15 Minuten wirken muss. Anschließend wird eine Standzeit von 60 Minuten unter der Einwirkung des Eigengewichtes gefordert. Dies deckt den Zeitraum zur Bergung der Person ab [31], [32].

Statisches System für Überkopfverglasung

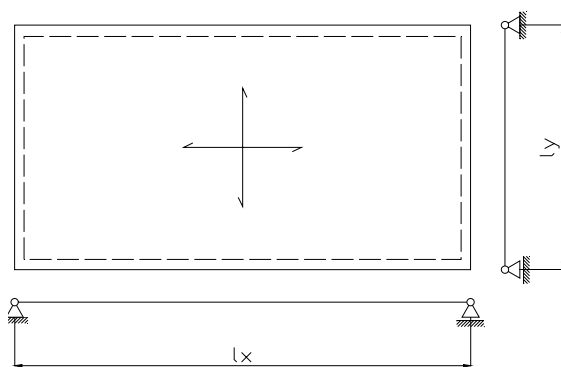


Bild 35: umlaufend linienförmig gelenkig gelagerte Rechteckplatte [6]

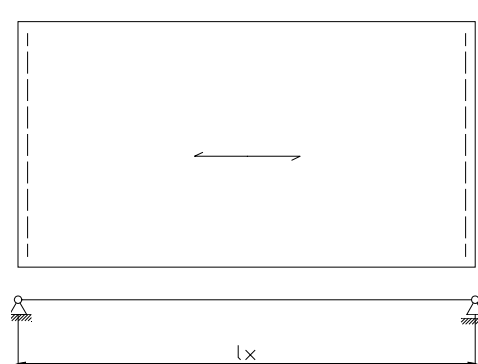


Bild 36: zweiseitig linienförmig gelenkig gelagerte Rechteckplatte [6]

4.2.4 Tragende Glasbauteile

Für die Bemessung von Bauteilen aus Glas, die zur Lastabtragung dienen, gibt es derzeit noch keine Regelwerke. Dennoch ist mit ausreichender Kenntnis der kritischen Punkte bei der Verwendung von Glas und einer sauberen konstruktiven Durchbildung eine Bemessung noch möglich. Durch eine materialgerechte Planung sind Tragkonstruktionen aus Glasbalken, -stützen, -schwertern und -ecken möglich [10].

Glasbalken und Glasschwerter

Die Balken bestehen in der Regel aus 3-fach VSG mit einer tragenden Scheibe aus ESG innen und zwei Sicherheitsscheiben aus ESG oder TVG außen. Diese werden mit einer Schubelastischen Zwischenschicht verbunden. Über die Lochleibung an den Auflagern werden angreifende Lasten abgetragen. Die Bohrungen sollten an den Außenscheiben etwas größer sein und anschließend mit Zweikomponentenmörtel verfüllt werden. So kann die Last direkt von der ESG-Scheibe abgetragen und die Maßtoleranzen der VSG abgefangen werden. Die ETH Zürich hat ausreichend Versuche zum Tragverhalten von Balken durchgeführt.

Glasschwerter sind in Fassaden eingesetzte Glasbalken, die als Pfosten dienen. Bei langen Stützweiten sollten sie aus mehreren Teilen, über Punkthalter oder Reibverbindungen zusammengesetzt werden [10], [5].



Bild 37: Glaspulldach im Atrium der IHK München [10]



Bild 38: Lochleibungsverbindung im Glasbau [10]

Glasecken



Bild 39: Bildungswerk der sächsischen Wirtschaft (Foto: Christoph Reichelt)

Fassaden ohne Eckpfosten heben die Leichtigkeit des Bauwerkes hervor. Neben der komplizierten Ausführung entstehen in den Bereichen Wärmebrücken. Die Verbindung erfolgt über eine ganzflächige Verklebung mit Silikon. Da die statische Wirksamkeit nicht geregelt ist, muss die Ausbildung gesondert nachgewiesen werden. Für die Bemessung sind die Windsogspitzen an den Gebäudeecken zu beachten. Sie etwa doppelt so groß sind, wie die Winddrucklasten. Konstruktiv gibt es zwei Varianten zur Ausbildung: einmal auf Gehrung geschnittenes und zum anderen mit abgestuftem Isolierglas. Wobei die letztere die wirtschaftlichere ist [10].

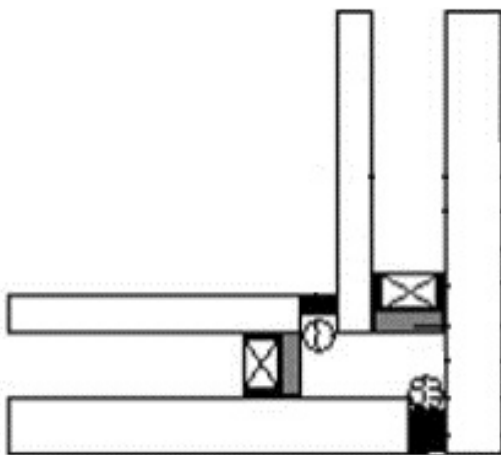


Bild 40: Ganzglasecke mit gestuftem Isolierglas [10]

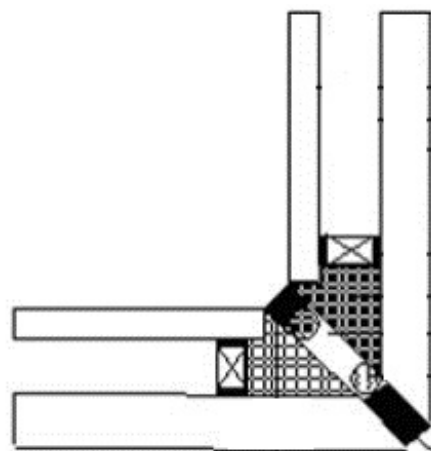


Bild 41: Ganzglasecke mit auf Gehrung ausgeführtem Isolierglas [10]

4.3 Regelwerke

4.3.1 Bauordnungen

Musterbauordnung (MBO)

Die MBO vereinheitlicht die Landesbauordnungen, welche unter dem jeweiligen Landesrecht stehen. Sie ist ein Gesetz für bauliche Anlagen und Bauprodukte sowie für Grundstücke und andere Anlagen und Einrichtungen. Von der Bauordnung sind ausgeschlossen: öffentlicher Verkehr, Anlagen unter Bergaufsicht, öffentlichen Versorgungsleitungen, Kränen und Krananlagen und Rohrleitungen im Ferntransport [22, § 1]. Bauliche Anlagen und ihre Einzelteile sind so zu errichten, anzuordnen und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit, Ordnung und das menschliche Leben nicht gefährdet werden. Diese Anlagen werden aus Bauprodukten (Baustoffe, -teile) hergestellt und als Bauart bezeichnet, wenn diese und ihre Verwendung ortsfest gebunden sind [22, § 2].

Beispiel:

- | | |
|--|--------------|
| - fertiges Fenster auf der Baustelle eingebaut | → Bauprodukt |
| - Zusammenbau von Isolierglas und Fensterrahmen
auf der Baustelle | → Bauart |

Bauprodukte werden nach MBO, in Abschnitt 3 eingeteilt in, nicht geregelt und sonstige unterschieden.

Gebäude sind z.B. selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen. Sie werden nach [22, § 2, Satz 3] in fünf Klassen eingeteilt.

Landesbauordnung (LBO)

Die LBO setzt die Musterbauordnungen in den einzelnen Ländern um und regelt den Umgang mit den Bauprodukten und Bauarten. Sie ist in Deutschland wesentlicher Bestandteil des öffentlichen Baurechts. Die Bauordnung regelt die Anforderungen, die an ein Bauvorhaben gestellt werden und sich auf Grundstück und Bebauung beziehen [6].

National					Europäisch
Geregelt	Nicht geregelt			Sonstige	Geregelt
	Allgemein	Keine erhebliche Anforderungen oder allgemein anerkannte Prüfverfahren	Bauaufsichtlich Untergeordnete Bedeutung		
BRL A Teil 1		BRL A Teil 2	BRL C	Allgemein anerkannte Regeln der Technik	BRL B
Technische Regeln	ZiE oder abZ	abP	Kein Verwendbarkeitsnachweis	Kein Verwendbarkeitsnachweis	Technische Regeln und Verwendbarkeitsbeschränkung
Nachweis der Übereinstimmung			Kein Nachweis der Übereinstimmung		Nachweis der Konformität
Ü-Zeichen			Kein Ü-Zeichen		CE-Zeichen

Tab. 9: Unterscheidung der Bauprodukte nach MBO [6, Tab. 2.1]

4.3.2 Bauregellisten (BRL)

Die jährlichen Mitteilungen des DIBt beinhalten die von der obersten Landesbehörde eingeführten technischen Regeln für Bauprodukte und –arten. Somit ist diese Veröffentlichung als eine umfassende Darstellung der bauaufsichtliche Vorgaben zur Verwendung von Bauprodukten anzusehen, an die bauaufsichtliche Anforderungen gestellt werden. Es gibt drei Unterteilungen (A, B, C) für verschiedene Regelbereiche. Änderungen und Ergänzungen stehen innerhalb der Einspruchsfrist auf der Internetseite vom DIBt als Entwurfsfassung [21].

Bauregelliste A:

Teil 1 beinhaltet geregelte Bauprodukte, deren technische Regeln, die erforderlichen Übereinstimmungsnachweise und die Verwendbarkeitsnachweise bei Abweichungen von den technischen Regeln.

Teil 2 und Teil 3 gelten für nicht geregelte Bauprodukte, deren Übereinstimmungsnachweis über ein abP erfolgt. Die Produkte erfüllen somit keine erheblichen Anforderungen an die Sicherheit baulicher Anlagen, für diese gibt es keine technischen Regeln oder ihre Verwendbarkeit wird durch anerkannte Prüfverfahren beurteilt [6], [21], [27].

Bauregelliste B:

Auflistung von Bauprodukten, die gemäß den Vorschriften der Mitgliedstaaten der EU in Verkehr gebracht und gehandelt werden dürfen und eine CE-Kennzeichnung besitzen.

Teil 1 ist Bauprodukten vorbehalten, deren Brauchbarkeitsnachweis mittels der harmonisierten Normen (hEN) nach dem Bauproduktengesetz (BauPG, siehe 4.3.4) erfolgt. Für diese gibt es, abhängig vom Verwendungszweck, technische Spezifikationen, Klassen und Leistungsstufen. Sie tragen das CE-Kennzeichen [6], [21], [27].

Teil 2 beinhaltet Bauprodukte, die durch andere Richtlinien als der Bauproduktenrichtlinie in Umlauf gehen. Sie tragen eine CE- und Ü-Kennzeichnung, aber entsprechen nicht allen Anforderungen des BauPG. Deswegen sind zusätzliche Verwendbarkeitsnachweise erforderlich [6], [21], [27].

Bauregelliste C:

Beinhaltet nicht geregelte Bauprodukte ohne technische Baubestimmungen und technische Regeln. Sie spielen daher eine untergeordnete Rolle für die Erfüllung baurechtlicher Anforderungen und dürfen keine Ü-Kennzeichnung tragen [6], [21], [27].

4.3.3 Bauproduktengesetz (BauPG)

Das Gesetz regelt die Markteinführung von Bauprodukten und den freien Warenverkehr. Es setzt die europäische Bauproduktenrichtlinie (BPR, siehe 4.3.4) um und gleicht die Rechts- und Verwaltungsvorschriften der europäischen Mitgliedsstaaten über Bauprodukte und andere Rechtsakte der EG an. Die Erfordernisse der europäischen Binnenmärkte, der technische Fortschritt und die Sicherheit gelangen durch das BauPG in Einklang. Die Vorschriften des Gesetzes gelten für die europäischen Zulassungen und ihre Leitlinien, sowie für die Kommission der EU¹⁶ [37], [38].

4.3.4 Bauproduktenrichtlinie (BPR)

Die europäische Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG ist in Deutschland durch das BauPG vom 10.8.1992 umgesetzt worden. In ihr sind sämtliche öffentlich-rechtlichen Anforderungen, die an Bauwerke des Hoch- und Tiefbaus und ihre Bauprodukten gestellt werden, erfasst.

Die Anforderungen sind:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
2. Brandschutz,
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
4. Nutzungssicherheit,
5. Schallschutz,
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz.

Sie müssen bei normaler Instandhaltung über einen gewissen Zeitraum vom Bauprodukt erfüllt sein, ebenso wie die Nachweisverfahren sämtlicher relevanter EU-Richtlinien. Nur dann darf der Hersteller sein Produkt mit dem CE-Kennzeichen versehen.

¹⁶ EU – Europäische Union

Die Richtlinie gilt für Bauprodukte, die nationalen Vorschriften und Gesetzen unterworfen sind und verweist auf technische Spezifikationen (hEN, europäische technische Zulassung). In Deutschland wird die BPR in den Bauordnungen der Bundesländer umgesetzt [34], [35], [38].

4.3.5 Technischen Baubestimmungen

Der DIBt bereitet im Auftrag der Länder eine Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen (MLTB) vor, die die technischen Regeln aus den Bereichen Baurecht und Anlagensicherheit für die Planung, Bemessung und Konstruktion enthält. Sie wird in den einzelnen Bundesländern durch die Liste der technischen Baubestimmungen (LTB) umgesetzt und kann zeitlich variieren. Sie werden in der BRL A nach MBO § 17 Abs. 2 bekannt gegeben. Nach § 3 Abs. 3 Satz 1 der LBO müssen sie beachtet werden und sind somit allgemein verbindlich. Wenn eine technische Regel als technische Baubestimmung eingeführt wird, verändert sie ihren Rechtscharakter und ist somit nicht nur eine Empfehlung, sondern muss nach LBO beachtet werden [4], [6].

Sie besteht in der Regel aus folgenden 3 Teilen:

Teil 1: Technische Regeln für die Planung, Bemessung und Konstruktion baulicher Anlagen und ihrer Teile mit Produkten nach europäischer technischer Zulassung (ETZ) und harmonisierender europäischen Norm (hEN).

Teil 2: Anwendungsregeln für Bauprodukte und Bausätze nach ETZ und hEN nach der Bauproduktenrichtlinie der EU (89/100/EWG).

Teil 3: Anwendungsregelungen für Bauprodukte und Bausätze nach europäischen technischen Zulassungen und harmonisierten Normen nach der Bauproduktenrichtlinie im Geltungsbereich von Verordnungen nach § 18 Abs. 4 und § 22 Abs. 2 LBO.

4.3.6 Technische Regeln

Technische Regeln sind keine Rechtsnormen, sondern Empfehlungen, Vorschläge oder Handlungsanweisungen, die den Weg zur Einhaltung von Gesetzen, einer Verordnung oder eines technischen Sachverhaltes einleiten. Sie werden vom DIBt heraus gegeben und sind in allen Bundesländern bauaufsichtlich eingeführt. Durch die Einführung dieser Empfehlungen in die LTB können sie aber auch Gesetzeskraft erlangen. Diese Regeln dienen im Wesentlichen der technischen Sicherheit von Leben, Sachgütern und Gesundheit und dem Schutz der Umwelt. Sind diese Empfehlungen, z.B. beim Bau von Anlagen eingehalten, so entspricht diese Anlage „dem Stand der Technik“¹⁷. Für den Konstruktiven Glasbau sind die drei folgenden Technische Richtlinien relevant [39], [40].

Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerter Verglasung (TRLV)

Für den konstruktiven Glasbau und seine Bemessung ist es das wichtigste Regelwerk. Es gilt für Verglasungen, die an mindestens zwei gegenüberliegenden Seiten linienförmig gelagert sind. Die Technischen Regeln wurden vom DIBt 1989 verabschiedet und behandeln Vertikal- und Überkopfverglasungen, sowie begehbare Verglasung und deren Besonderheiten. Sie gelten nicht für geklebte Fassaden, aussteifende Bauteile und gekrümmte Überkopfverglasungen. Bei der Berechnung von Isolierglas werden die dort vorhandenen Besonderheiten, wie z.B. die klimatischen Einwirkungen, erläutert (siehe auch 5.1.1). Berücksichtigt werden Verglasung aus SPG, Guss-, ESG, ESG-H aus SPG, TVG, VSG und VG. Der Nachweis der Tragsicherheit erfolgt nach dem Konzept der zulässigen Spannungen (siehe auch 5.1). Eine günstige Verbundwirkung bei VSG wird nicht berücksichtigt. Bei Vertikalverglasung aus MIG mit VG ist zusätzlich der Grenzzustand des vollen Schubverbundes zu berücksichtigen, wenn dieser sich ungünstig auswirkt. Denn dieser hat Einfluss auf die Klimabelastungen [6], [8].

¹⁷ Stammt ursprünglich aus der Umweltgesetzgebung: „Der Stand der Technik umfasst fortschrittliche Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, die in der Praxis geeignet erscheinen, die bestmögliche Begrenzung von Gefahren zum Schutz der Allgemeinheit zu sichern, ohne die Umwelt zu beeinträchtigen“.

Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernder Verglasung (TRAV)

In der TRAV werden Vertikalverglasung geregelt, die Personen gegen seitlichen Absturz sichern sollen. Der Geltungsbereich umfasst Vertikalverglasung nach der TRLV mit zusätzlichen Anforderungen, wie tragende Glasbrüstungen mit durchgehendem Handlauf und Geländerausfachungen aus Glas, die die Anforderungen nach den TRLV und nach den TRAV erfüllen. Die TRAV definieren drei Kategorien:

Kategorie A: Die absturzsichernde Funktion erfolgt ausschließlich über das Glas, welches keinen Riegel in Holmhöhe oder einen vorgesetzten Holm besitzt (Ganzglasbrüstung oder raumhohe Wände ohne Holm). Der statische Nachweis erfolgt mit Wind-, Klima- und voller Holmlast.

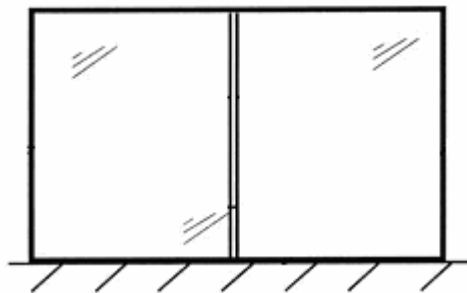


Bild 42: Beispiel Kategorie A [41]

Kategorie B: Die absturzsichernde Funktion wird über eine eingespannte Ganzglasbrüstung mit durchgehendem Handlauf, welcher bei Ausfall eines Scheibenelementes die Holmlast übertragen muss, gewährleistet. Benachbarte Scheibenelemente müssen die planmäßige Holmlast aufnehmen können. Für diese außergewöhnliche Bemessungssituation dürfen die zulässigen Spannungen um den Faktor 1,5 erhöht werden.

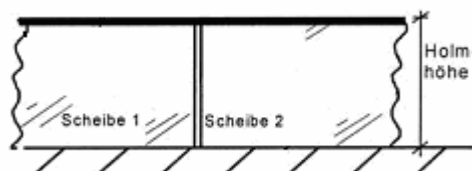


Bild 43: Beispiel Kategorie B [41]

Kategorie C: Dies sind lediglich ausfachende Verglasungen, deren statische Nachweise nur mit Wind- und Klimabelasten geföhrt werden. Die Holmlast wird von vorgesetzten Querriegeln mit Holmen aufgenommen.

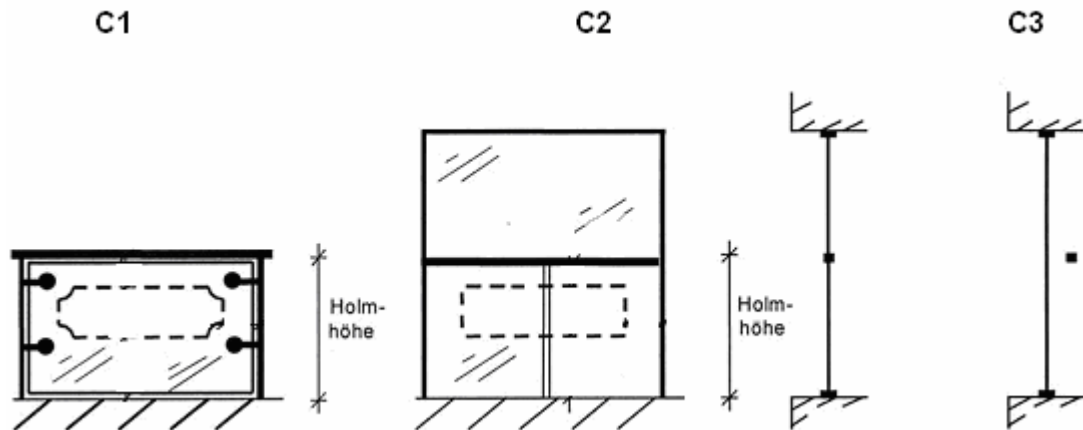


Bild 44: Beispiel Kategorie C [41]

Der Nachweis der Tragfähigkeit durch statische Einwirkung erfolgt wie bei der TRLV [8]. Stoßartige Einwirkungen können alternativ, wie folgt nachgewiesen werden:

- experimentell mit dem Pendelschlagversuch,
- Verwendung einer Verglasung mit Zulassung,
- rechnerischer Nachweis mit Spannungstabellen.

Durch die Einführung der TRAV werden geprüfte Konstruktionsvarianten vorgestellt und Mindeststandards definiert. So kann Glas auch für sicherheitsrelevante Bauteile, wie Brüstungen, eingesetzt werden, ohne zeit- und kostenintensive ZiEs beantragen zu müssen [6], [10], [41].

Technische Regeln für die Bemessung und Ausführung von punktförmig gelagerter Verglasung (TRPV)

Dieses Regelwerk befasst sich mit Vertikal- und Überkopfverglasungen, die punktförmig durch mechanische Halterungen formschlüssig gelagert sind. Die Scheiben müssen zwängungsfrei eingebaut werden. Es dürfen VSG aus ESG, ESG-H oder aus TVG Scheiben verwendet werden. Isolierglas muss zweischeibig ausgeführt werden und durch Randklemmhalter gehalten sein, wobei für beide Verglasungseinheiten VSG zur Anwendung kommt (ESG-H, ESG oder TVG). Bei punktgehaltenen Verglasungen ist ein Abstand vom Glasrand bis zum Lochanfang zwischen 80 mm und 300 mm einzuhalten. Um die Hauptzugspannungen zu ermitteln, ist eine Berechnung mittels FE-Model durchzuführen, welches die Spannungskonzentrationen an den Bohrlochern realistisch erfasst. Der Trag sicherheitsnachweis erfolgt nach der TRLV [6], [33].

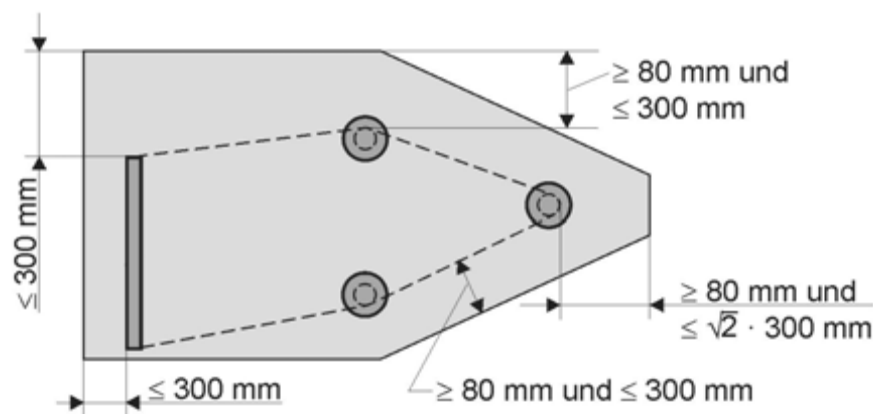


Bild 45: Maximale und minimale Abstände vom Glasrand bis zum Lochanfang [33]

4.3.7 Normen

Neben den Technischen Regeln zur Berechnung von Glasscheiben gibt es ebenfalls DIN Normen. Dies gilt im Speziellen bei der Betrachtung von Sonderfällen, wie z.B. Reinigungs- oder Reparaturzwecken für betretbare Überkopfverglasungen. Zudem sind einige Aspekte von Fassadenkonstruktionen genormt.

Norm	Kurzbeschreibung
DIN 18516-4	Diese DIN befasst sich mit hinterlüfteten Außenfassaden aus thermisch vorgespannten ESG-Scheiben. Die punkt- oder linienförmig Lagerung umfasst die gesamte Scheibendicke.
DIN 4426	Einrichtung zur Instandhaltung baulicher Anlagen, sicherheitstechnische Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege – Im Glasbau im Falle einer Reinigung von begehbaren Verglasungen relevant
DIN EN 18008	Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen

Tab. 10: Normenübersicht

5 Tragsicherheitsnachweise für Glasscheiben

Nachfolgend werden nur Tragsichersicherheitsnachweise für linienförmig gelagerte Verglasungen betrachtet.

5.1 Theoretische Ansätze

Die Berechnung der Schnittkräfte, die durch äußere Belastungen in einer Glasscheibe auftreten, erfolgt aus praktischen Gründen meist nach der Theorie I. Ordnung (Theorie der kleinen Verformungen). Die Vernachlässigung der Membranwirkung führt zu Ergebnissen, welche auf der sicheren Seite liegen. Zweiseitig gelagerte Glasscheiben werden auf einfache Art und Weise als Einfeldträger berechnet. Für vierseitig gelagerte Rechteckscheiben stehen zur Spannungsermittlung Tafeln [8] oder Formeln von Bach, Feldmeier oder Beyle¹⁸ zur Verfügung.

	Bach	Beyle	Feldmeier
Spannung	$\sigma = \frac{\varphi \cdot p \cdot (b/2)^2}{d^2}$	$\sigma = \kappa(\sigma) \cdot A_t \cdot q \cdot l^4$	$\sigma = \frac{p \cdot a^2}{d^2} \cdot B_{\sigma(e)}$
Durchbiegung	$f = \frac{\psi \cdot p \cdot (b/2)^4}{E \cdot d^3}$	$f = \kappa(\omega) \cdot C_t \cdot q \cdot l^4$	$f = \frac{p \cdot a^4}{E \cdot d^3} \cdot B_{f(e)}$
Erläuterung	p... Flächenbelastung E... Elastizitätsmodul d... Glasdicke a... lange Glasseite b... kurze Glasseite φ/ Ψ ... Beiwerte Platten-theorie	q... Flächenlast l... Stützweite A _t / C _t ... dimensionsbezogene Werte κ(ω)... Beiwert in Abhängigkeit von ε κ(σ)... Beiwert in Abhängigkeit von ε ε... Seitenverhältnis b/a	a... kurze Glasseite p... Flächenlast d... Plattendicke E... Elastizitätsmodul B _f (e)/ B _σ (e)... Beiwerte der linearen Plattentheorie [49]

Tab. 11: Berechnungsmöglichkeiten für Spannung und Durchbiegung von Platten mit 4- seitigen Lagerung [48]

Für Dreieck- und kreisförmige Scheiben gibt es nach [49] ebenfalls entsprechende Beiwerte und Tabellen. Die Anwendung der linearen Plattentheorie führt zu größeren Glasdicken, da ein günstig wirkender Membraneffekt nicht berücksichtigt wird [14].

¹⁸ Auf der lineare Plattentheorie basierende, einfache Formeln zur Bestimmung von Spannungen und Durchbiegungen von Platten unter Biegebeanspruchung per Handrechnung [10].

5.1.1 Besonderheiten

Membraneffekt

Der Membraneffekt kommt vor allem dann zum Tragen, wenn die Verformung einer Platte größer ist als ihre Dicke. Hierbei überlagert sich ein Membranspannungszustand, der sich an der Lastabtragung beteiligt mit dem Biegespannungszustand. In Plattenmitte bildet sich dadurch ein ellipsenförmiger Ring aus, wo Membranzug- und Membrandruckspannung im Gleichgewicht stehen. Bei frei verschieblichen Rändern ist für die Membranwirkung eine zweiachsige Lastabtragung der Platte notwendig. Die Membranwirkung reduziert die Hauptzugspannung und die Durchbiegung [15].

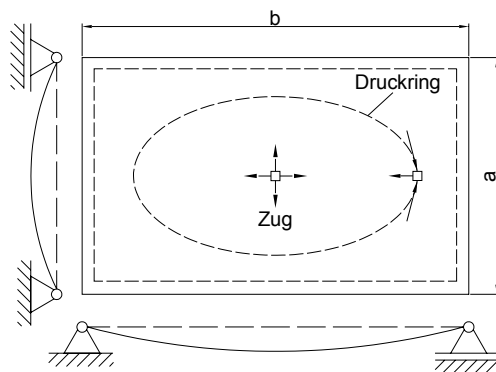


Bild 46: Aktivierung von Membranwirkung [15, Bild 6.35]

Kopplungseffekt

Bei Isolierglas tragen alle Scheiben die angreifenden Lasten ab – da diese durch den luftdichten SZR gekoppelt sind. Wird eine Scheibe belastet, verändert sich das Volumen des Füllgases so, dass die anderen ebenfalls lastabtragend wirken. Mit Hilfe des so genannten Isolierglasfaktors und der Glassteifigkeit kann der Kopplungseffekt mathematisch beschrieben werden. Die Anteile der Außen- und Innenscheibe an der Gesamtsteifigkeit lassen sich mit folgenden Formeln errechnen:

$$\begin{array}{ll} \text{außen} & \text{innen} \\ \delta_a = \frac{d_a^3}{d_a^3 + d_i^3}; & \delta_i = 1 - \delta_a \end{array}$$

Klimabelastung:

Wie schon unter dem Kapitel 3.4 Klimalasten erwähnt, entstehen durch bestimmte klimatische Veränderungen zusätzliche Lasten für Isolierglasscheiben, die sich mit den äußeren Lasten überlagern. Die daraus resultierenden maximalen Biegespannungen und Verformungen lassen sich nach Tab. 11 berechnen. *Feldmeier* definiert für die klimatisch induzierte Belastung die charakteristische Kantenlänge a^* , sie ist das Maß für die Empfindlichkeit einer Verglasung gegenüber Klimalasten und abhängig von den Scheibendicken und -abstand.

$$a^* = \sqrt[4]{\frac{E \cdot d_{SZR} \cdot d_a^3 \cdot d_i^3}{p_L \cdot (d_a^3 + d_i^3) \cdot B_V}}$$

$$= 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{d_{SZR} \cdot d_a^3 \cdot d_i^3}{(d_a^3 + d_i^3) \cdot B_V}}$$

$d_{i/a}...$ Glasscheibendicke innen/außen
 $d_{SZR}...$ Scheibenabstand
 $E...$ Elastizitätsmodul von Glas
 $p_L...$ Luftdruck am Einbauort ($\sim 0,1$ MPa)
 $B_V...$ Beiwert in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis a/b nach [49]

Über die charakteristische Kantenlänge erfolgt die Berechnung des Isolierglasfaktors φ , mit dem die effektive Klimabelastung der Isolierglasscheibe bestimmt wird [14], [15]:

$$\varphi = \frac{I}{1 + (a/a^*)^4};$$

$$p_i = \varphi \cdot p_0;$$

$p_0...$ isochorer Druck
 $\varphi...$ Isolierglasfaktor

Mit Hilfe dieses Faktors φ und den Verhältnissen der Biegesteifigkeiten δ_i und δ_a lassen sich die Einwirkungen auf die innere und äußere Scheibe des Isolierglases aufteilen.

Lastangriff auf...	Einwirkung	Lastanteil äußere Scheibe	Lastanteil innere Scheibe
äußere Scheibe	Wind w_a	$(\delta_a + \varphi \cdot \delta_i) \cdot w_a$	$(1 - \varphi) \cdot \delta_i \cdot w$
	Schnee s	$(\delta_a + \varphi \cdot \delta_i) \cdot s$	$(1 - \varphi) \cdot \delta_i \cdot s$
innere Scheibe	Wind w_i	$(1 - \varphi) \cdot \delta_a \cdot w_i$	$(\delta_i + \varphi \cdot \delta_a) \cdot w_i$
beide Scheiben	Klima p_i	$-\varphi \cdot (\pm p_0)$	$\varphi \cdot (\pm p_0)$

Tab. 12: Verteilung der Einwirkungen bei einer Isolierglasscheibe [8; Tab. A2]

Zwängungsbeanspruchung

Zwängungen sind Einwirkungen, die keine vordefinierte Größe haben und oft durch klima-induzierte Einwirkungen entstehen, z.B. bei MIG. Sie können bei Glasbauteilen leicht zum Bruch führen, da keine Spannungumlagerung möglich ist – d.h., die Spannungsspitzen können nicht durch plastisches Fließen abgebaut werden. Deshalb sollte diese Belastung recht gering gehalten werden. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Unterkonstruktion und des Glases sollten daher beachtet werden. Scheiben mit Punkthalterung sind idealerweise gelenkig zu lagern (z.B. Kugelgelenk). Ausgleichsmöglichkeiten von geometrischer Passgenauigkeit sollten planmäßig vorgesehen werden.

Sonnen- und Wärmeschutzverglasungen bilden wegen ihrem hohen Absorptionsgrad eine Besonderheit. Kantenlängen unter 50 cm mit einem sehr großen SZR sind äußerst ungünstig, da diese zu großen Spannungen führt [15].

Stoßbelastung

Neben den Nachweisen für statische Einwirkungen sind für Überkopf-, absturzsichernde und begehbare Verglasung zusätzlich Nachweise für dynamische Belastungen durchzuführen. Hierbei können sich Masse, Form und Verformungsverhalten der Stoßkörper unterscheiden, daher werden zwei Varianten unterschieden.

a) harter Stoß

Im Verhältnis zum Bauteil, kommt hier ein sehr harter und kaum verformbarer Stoßkörper zum Einsatz, der mit hoher Geschwindigkeit auf das Bauteil trifft. Er symbolisiert z.B. das Herunterfallen eines Blumentopfes oder Hageleinschlag. Die Auswirkungen bleiben lokal beschränkt.



Bild 47: Kugelfallversuch nach DIN 52338 [50]

b) weicher Stoß

Ein Stoßkörper prallt mit geringer Geschwindigkeit auf das Bauteil und verformt sich merkbar, damit bleibt die Auswirkung nicht lokal begrenzt, sondern beansprucht weitere Bereiche. Diesen Versuch müssen aktiv absturzsichernde Konstruktionen erfüllen [15], [44].



Bild 48: Pendelschlagversuch mit verformbarem Stoßkörper [44]

Schubverbund

Bei VSG oder VG¹⁹ ist der Schubverbund stark von der Temperatur und der Belastungsdauer abhängig. Ursache ist das Kriechverhalten von PVB-Folie und Kunstharz. Die Zwischenschicht bestimmt über ihre Schubsteifigkeit und -tragfähigkeit das mechanische Verhalten der Verbundscheibe. Man unterscheidet allgemein in drei Kategorien:

a) Voller Verbund:

Bei kurzzeitigen Einwirkungen, wie z.B. Stoß wirken die beiden Scheiben als ein Ganzes und somit können Biegespannung und Verformung über die gesamte Querschnittshöhe angesetzt werden.

$$d^* = d_1 + d_2 + \dots + d_n \quad [8]$$

b) Teilweiser Verbund:

Bildet sich, wenn Langzeiteinwirkungen bei Raumtemperatur auftreten. Er kann über aufwendige Hand- oder FEM-Berechnungen berücksichtigt werden. Für die meisten bemessungssituationen des alltäglichen Gebrauchs liegt in Wirklichkeit ein teilweiser Verbund vor.

c) Kein Verbund

Kein Verbund liegt bei hoher Belastungsdauer und hohen Temperaturen vor. Die Belastung verteilt sich entsprechend dem Verhältnis, Einzel- zur Gesamtbiegesteifigkeit. Die Verformungen von VSG-Scheiben können mit einer ideellen Ersatzdicke ermittelt werden:

$$d^* = \sqrt[3]{d_1^3 + d_2^3 + \dots + d_n^3} \quad [8]$$

Die Belastungsanteile für die obere und untere Scheiben ergeben sich wie folgt:

$$\delta_a = \frac{d_a^3}{d_a^3 + d_i^3}; \quad \delta_i = \frac{d_i^3}{d_i^3 + d_a^3} = 1 - \delta_a \quad [8]$$

Nach den heutigen Technischen Regeln (z.B. TRLV [8]) darf bei der Bemessung für Lasteinwirkung kein Schubverbund angesetzt werden. Bei Isolierglas, sind beide Grenzzustände zu berücksichtigen, da wegen dem stark temperaturabhängigen Kriechverhalten

¹⁹ Erfüllt das Verbundbauteil die Anforderung an Haftung und Splitterbindung nicht, so bezeichnet man es nur als Verbundglas (VG) und nicht als Verbund-Sicherheitsglas (VSG)

die klimatisch induzierten Belastungen und die Beanspruchung der Einzelscheibe vom effektiven Steifigkeitsverhältnisse abhängig sind. Im Falle eines völligen Verlustes der Verbundwirkung würde sich die Biegespannung verdoppeln und die Verformung vervierfachen. Wird der Verbund bei der Berechnung vernachlässigt, ist man nicht zwangsläufig auf der sicheren Seite. Bei Zwangsbeanspruchung muss der Verbund mit angesetzt werden, da Zwängungen durch Verformungen höhere Beanspruchungen bei vollem Verbund bedeuten [14], [15], [44].

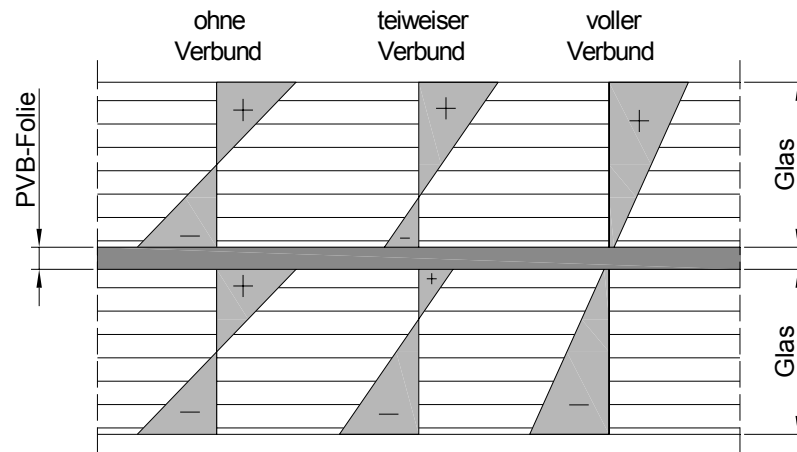


Bild 49: Spannungsverlauf bei VSG mit verschiedenem Schubverbund [44, Fig. 19]

Resttragfähigkeit

Die Resttragfähigkeit ist der Widerstand in einem bestimmten Zeitraum (Standzeit) gegen vollständiges Versagen eines teilweise zerstörten Systems,. Diese Resttragfähigkeit bedeutet, dass sich eine beschädigte Konstruktion noch eine gewisse Zeit in einem sicheren Einbauzustand befinden muss. Damit können größere Verformungen der Konstruktion zugelassen werden bzw. man akzeptiert ein geringeres Sicherheitsniveau. Glasbauteile im Überkopfbereich z.B. müssen bei Glasbruch eine gewisse Zeit unter vollständigem Eigengewicht und reduzierter Schneelast standhalten; sie dürfen sich nicht aus der Konstruktion lösen und als Ganzes herabstürzen. Diese Anforderungen gewährleisten, dass bei einem spontanen Glasbruch keine Personen verletzt werden. Die Nachweise, sowie Mindeststandzeit und Größe der Belastung müssen auf die jeweiligen Bauteile und deren entsprechenden Sicherheitsanforderungen abgestimmt werden. So sind die Nachweise bei normaler Überkopfverglasung anders als bei begehbaren Überkopfverglasungen. Vertikalverglasungen haben eine bessere Resttragfähigkeit als Horizontalverglasungen, da das Eigengewicht in der Scheibenebene wirkt. Eine Verbesserung der Resttragfähigkeit kann mit einer PVB-Folie erzielt werden [14], [15].

Resttragfähigkeit bei Zerstörung aller Scheiben	Gering	Mäßig	Gut	Sehr gut
VSG aus Floatglas				x
VSG aus ESG	x			
VSG aus TVG			x	
VSG aus ESG+TVG		x		
Drahtglas		x		
4- seitige Lagerung				x
2- seitige Lagerung	x			
Punkthalter mit Teller			x	
Punkthalter versenkt		x		

Tab. 13 Resttragfähigkeit von VSG für verschiedene Glasarten und Lagerungsarten [44]

VSG aus Floatglas besitzt die beste Resttragfähigkeit, da sich die großen Bruchstücke am besten verzahnen. Der Verzahnungszustand ist durch eine für die Resttragfähigkeit günstige Rissübertragung zwischen oberer und unterer Scheibe gekennzeichnet.



Bild 50/ 51: Resttragfähigkeit einer Treppenstufe, VSG aus TVG für eine Überdachung [44, Fig.78]

Stabilität

Schlanke druckbeanspruchte Tragelemente aus Glas sind stets auf Stabilitätsversagen zu prüfen. Im Nachweis nach Theorie II. Ordnung sind hierbei Vorverformungen aus Maßtoleranzen, Verbindungen und dem Schubverbund zu berücksichtigen. Der Schubverbund selbst darf bei VSG-Scheiben nicht angesetzt werden, da er bei einer Dauerbelastung bei höheren Temperaturen nicht gewährleistet ist [15].

5.1.2 Sicherheitskonzepte

Deterministisches Sicherheitskonzept

Das deterministische²⁰ Sicherheitskonzept geht von der idealen Vorstellung aus, dass Einwirkungs- und Widerstandsgrößen feste Werte besitzen. Im Bauwesen – auch Konzept mit zulässigen Spannungen genannt – werden hierbei Schnittgrößen, Spannungen, Dehnungen, Verformungen und Schwingungen miteinander verglichen. Da diese Werte jedoch hohen Streuungen unterliegen, muss bei Tragsicherheitsnachweisen ein globaler Sicherheitswert auf der Widerstandsseite ($\gamma_k = 2 - 4$) eingeführt werden, um Risiken abzudecken und so genügend Sicherheit zu gewährleisten. Bei der deterministischen Glasbemessung ist dieser nicht direkt ausgewiesen. Es ist möglich, den Beiwert aus dem Quotienten der charakteristischen Biegefestigkeit und der zulässigen Hauptzugspannung nach [15, Tab. 6.6] zu berechnen.

$$\gamma_k = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_k} \quad \gamma_k \dots \text{Sicherheitsfaktor}$$

$\sigma_{zul} \dots$ zulässige Hauptzugspannung der Glasscheibe
 $\sigma_k \dots$ Glasfestigkeit (5 % - Fraktilwert der oberflächennahen Zugfestigkeit der Glasscheibe)

Der Sicherheitsfaktor γ_k variiert bei der Glasbaubemessung stark, da er auch die unterschiedlichen Einflüsse aus der Belastungsdauer abdeckt. Die Nachweisform dieses Konzepts ist in der TRLV [8] verankert. Vorhandene charakteristische Hauptzugspannungen, nach linearer Elastizitätstheorie berechnet werden zulässigen gegenüber gestellt, verglichen.

$$\sigma_{vorh} \leq \sigma_{zul}$$

Neben dem Nachweis der Tragfähigkeit sind ebenso die Kriterien der Gebrauchtauglichkeit einzuhalten. Im Glasbau werden dafür meist zulässige Werte vorgegeben, wie für linienförmig gelagerte Verglasungen nach Tab. 11. Bei Isoliergläsern sind zusätzlich die Grenzwerte der Hersteller zu beachten. Die Durchbiegung der Auflagerprofile muss ebenfalls begrenzt werden. Die Unterkonstruktion darf sich maximal 1/200 der aufzulagernden Scheibenlänge durchbiegen, jedoch nur maximal 15 mm betragen. Die Bedingung soll ermöglichen, dass die Schnittgrößenermittlung im Glas vereinfacht an einer starr gelagerten Platte erfolgen kann

²⁰ eindeutiger Beziehung zwischen Ein- und Ausgabe (bzw. vorhandenen und zulässigen Werten)

Der Vorteil dieses Konzeptes ist die einfache Handhabung. Berechnungen erfolgen mit einfachen Mitteln, Handrechnungen und überschlägigen Vordimensionierungen, die rasch zu Ergebnissen führen [8], [14], [15], [44].

Dieses Konzept lässt sich leicht an vorhandene Verfahren anpassen und ist einfach zu handhaben. Leider berücksichtigt es nicht das Werkstoffverhalten und die Ergebnisse sind gegenüber der Realität ungenau.

Glasart	Überkopfverglasung			Vertikalverglasung		
	σ_{zul} [N/mm ²]	$\sigma_{5\%}$ [N/mm ²]	γ_k [-]	σ_{zul} [N/mm ²]	$\sigma_{5\%}$ [N/mm ²]	γ_k [-]
ESG aus SPG	50	120	2,4	50	120	2,4
ESG aus Gussglas	37	90	2,4	37	90	2,4
emailliertes ESG aus SPG ²¹	30	70	2,4	30	70	2,4
SPG	12	45	3,8	18	45	2,5
Gussglas	8	25	3,1	10	25	2,5
VSG aus SPG	15 (25 ²²)	45	3,0 (1,8)	22,5	45	2,0
TVG	29	70	2,4	29	70	2,4
emailliertes TVG ²⁰	18	45	2,5	18	45	2,5

Tab. 14: Zulässige Biegespannungen, 5 % - Fraktilwert der Biegezugfestigkeit und zugehöriger Sicherheitsfaktor [15, Tab. 6.5, 6.6]

Lagerung	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
vierseitig	1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	keine Anforderung ²³
Zwei- und dreiseitig	Einfachverglasung: 1/100 der Scheibenstützweite in Haupttragrichtung	1/100 der freien Kante ²⁴
	Scheiben der Isolierverglasung: 1/200 der freien Kante	1/100 der freien Kante ²²

Tab. 15: Durchbiegungsbegrenzung [8, Tab. 3]

²¹ Emaille auf der Zugseite

²² Nur für die untere Scheibe einer Überkopfverglasung aus Isolierglas beim Lastfall "Versagen der oberen Scheibe" zulässig.

²³ Durchbiegungsbegrenzungen des Isolierglasherstellers sind zu beachten

²⁴ Auf die Einhaltung dieser Begrenzung kann verzichtet werden, sofern nachgewiesen wird, dass unter Last ein Glaseinstand von 5 mm nicht unterschritten wird.

Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

Semiprobabilistische Sicherheitskonzepte versuchen die einzelnen Einflussfaktoren den Sicherheitsnachweisen detaillierter als beim globalen Sicherheitskonzept zu erfassen und zu gewichten. So werden die Streuungen der Einwirkungen und der Widerstände im Nachweis durch Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt.

Dieses Sicherheitskonzept geht auf verschiedene Aspekte ein, die in Teilsicherheitsfaktoren berücksichtigt werden, wie z.B.:

- Einwirkungsstreuung, -häufigkeit und -dauer
- Materialstreuung
- Flächeneinfluss
- Verschiedene Grenzzustände und Versagensmechanismen

Dadurch wird dem Materialverhalten von Glas besser Rechnung getragen und die Nachweise für Grenzzustände sind theoretisch genauer. Durch Lastfallkombinationen mit entsprechenden Beiwerten sind die Einflüsse besser voneinander abzugrenzen, da die Extremeinwirkungen nicht gleichzeitig auftreten. Der Bemessungswert einer Einwirkung muss kleiner dem des Widerstandes sein.

$$S_d \left[\sum (\gamma_G \cdot G_k) + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} (\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}) \right] \leq R_d \left[\frac{\eta_D \cdot \eta_F \cdot \sigma_k}{\gamma_R}; f \right]$$

G_k	charakteristische Werte der ständigen Einwirkung,
$Q_{k,1}$	Leitwert der veränderlichen Einwirkungen,
$Q_{k,i}$	weitere veränderliche Einwirkungen,
γ_G	Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Einwirkungen,
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen,
$\psi_{0,i}$	Kombinationsbeiwerte für veränderliche Einwirkungen,
σ_k	charakteristische Werte der Glasfestigkeit,
γ_R	Teilsicherheitsbeiwerte für Glasfestigkeit,
η_D	Einflussfaktor der Belastungsdauer auf die Glasfestigkeit,
η_F	Einflussfaktor der Flächengröße der Glasscheibe auf die Glasfestigkeit,
f	Grenzwert der Durchbiegung.

Der Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstandes γ_R wird in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Biegefestigkeit für den Sicherheitsindex $\beta = 4,7$ ²⁵ bzw. $\beta = 3,0$ ²⁶ unter Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung der Biegefestigkeiten ermittelt.

²⁵ Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

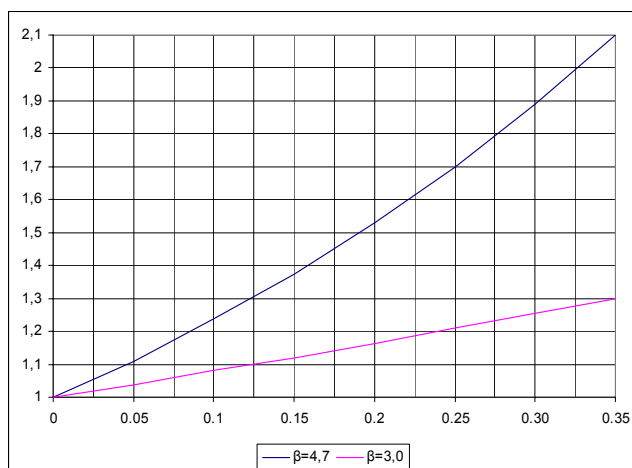


Bild 52: γ_R in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Biegesteifigkeit [51]

Abminderungsfaktoren und Beiwerte wurden durch die Bruchmechanik und die probabilistische Sicherheitstheorie hergeleitet. Für die Tragfähigkeit von Glas sind die vorhandenen Oberflächendefekte von entscheidender Bedeutung. Da der Bruch einer Glasscheibe mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht von der Stelle der maximalen Hauptzugspannung ausgeht, sondern dort hervorgerufen wird, wo eine ausreichend hohe Hauptzugspannung auf einen ausreichend großen Oberflächenriss trifft, wird ein Mittelwert der Hauptzugspannung im Nachweis eingeführt. Die Wahrscheinlichkeit des Versagens nimmt mit steigender Anzahl von Oberflächendefekten pro Fläche zu. Man berücksichtigt dies in dem Beiwert η_F .

Glasart	Einflussfaktor η_F 0,5 bis 4,0 m ²	Einflussfaktor η_F 4,0 bis 10 m ²
ESG	1,0	1,0
Float	1,0	0,9

Tab. 16: Einflussfaktoren η_F zur Berücksichtigung der Flächengröße von 4-seitig linienförmig gelagerten Scheiben [51]

Der Beiwert η_D berücksichtigt die Dauer der jeweiligen Belastung und mindert dadurch die Biegefestigkeit des Glases ab [14], [15].

Glasart	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Wind (10 min)	Schnee (30 Tage)	Wasserdruck (10 Jahre)	Eigenlast (50 Jahre)
ESG	120	1,00	0,83	0,77	0,74
Float	45	0,70	0,45	0,29	0,27

Tab. 17: Einflussfaktoren η_D der Belastungsdauer auf die Glassteifigkeit nach Shen [51]

²⁶ Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

5.1.3 Anwendung im Glasbau

Die DIN 18008 ist ein neuer Entwurf nach dem semiprobabilistischen Sicherheitssystem, welcher die bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke im Glasbau ablöst und das Konzept der zulässigen Spannung in das Konzept der Grenzzustände mit Teilsicherheitsbeiwerten umändert. Damit wird der eingeschränkte Anwendungsbereich der jetzigen Regeln erweitert und so auf den Stand der Technik gebracht. Auch Glaskonstruktionen mit ZiE oder abZ sollen künftig erfasst werden. Die DIN kommt bei linien- und punktförmig gelagerten Horizontal- und Vertikalverglasungen, sowie wie bei begehbaren oder absturzsichernden Verglasungen zur Anwendung. Sonderkonstruktionen und Zusatzanforderungen für Reinigungs- und Wartungszwecken werden ebenfalls erfasst.

Beschreibung	Zukünftig	Stand heute
Begriffe und allgemeine Grundlagen	DIN 18008 Teil 1	TRLV, DIN 1249, DIN EN ISO 12543
Linienförmig gelagerte Verglasungen	DIN 18008 Teil 2	TRLV
Punktförmig gelagerte Verglasungen	DIN 18008 Teil 3	TRPV
Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen	DIN 18008 Teil 4	TRAV
Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen	DIN 18008 Teil 5	DIBt-Mitteilung 2/2001, TRLV
Zusatzanforderungen an zu Reinigungs- und Wartungsmaßnahmen betretbare Verglasungen	DIN 18008 Teil 6	GS-Bau 18
Sonderkonstruktionen	DIN 18008 Teil 7	-
Produktnorm - Vorhangfassaden		DIN EN 13830
Außenwandbekleidungen, hinterlüftet aus Einscheiben -Sicherheitsglas		DIN 18516-4

Tab. 18: Technische Regeln und Normen [29]

Die Ermittlung der klimabedingten Lasten bei Isolierverglasung erfolgt wie nach der TRLV [8] und in Abhängigkeit von der Änderung des atmosphärischen Drucks, der Temperatur- und Ortshöhendifferenz. Ergänzend wird zwischen Zwei- und Dreischeiben-Isolierglas unterschieden.

	Einwirkungs- kombination	SZR	ΔT [K]	Δp_{met} [kN/m ²]	ΔH [m]	p_0 [kN/m ²]
Zweischeiben- Isolierglas	Sommer	1	+20	-2	+600	+16
	Winter	1	-25	+4	-300	-16
Dreischeiben- Isolierglas	Sommer	1	+20	-2	+600	+16,1
	Sommer	2	+13	-2	+600	+13
	Winter	1	-25	+4	-300	-16,1
	Winter	2	-15	+4	-300	-12,7

Tab. 19: Klimawerte für Isolierglas [29]

Neben konstruktiven Vorgaben, wie Kantenverletzung, Glaseinstand, Bohrungen, Randabständen und so weiter, werden Nachweise zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Resttragfähigkeit vorgegeben.

Ermittlung der Einwirkungen

$$E_d = \sum (\gamma_G \cdot G_k) + \gamma_Q \cdot Q_k$$

Ermittlung der Widerstandswerte

thermisch vorgespanntes Glas
(z.B. TVG)

$$R_d = \frac{k_c \cdot f_k}{\gamma_M};$$

Konstruktionsbeiwert $k_c = 1,0$

Biegezugfestigkeit f_k (Tab. 21)

Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,5$

Basisgläser (z.B. Floatglas)

$$R_d = \frac{k_c \cdot k_{\text{mod}} \cdot f_k}{\gamma_M};$$

Konstruktionsbeiwert $k_c = 1,8$

Biegezugfestigkeit f_k (Tab. 21)

Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,8$

Modifikationsbeiwert k_{mod} (Tab. 20)

Bei VSG- oder VG-Scheiben wird eine Steigerung und bei Scheibenkanten von nicht thermisch vorgespanntem Glas wird eine Abminderung des Widerstandwertes von 10 % angesetzt [29].

$$R_{d,neu} = R_d \cdot 1,1 \quad \text{bzw.} \quad R_{d,neu} = R_d \cdot 0,9$$

Einwirkungsdauer	Beispiel	k_{mod}
ständig	Eigengewicht	0,25
mittel	Schnee, Klimalasten	0,40
kurz	Wind, Holmlast	0,70

Tab. 20: Modifikationsbeiwert für Basisgläser [52, Tab. 6]

Glaserzeugniss alle Angaben in N/mm ²	charakteristische Zugfestigkeit*	(Widerstands-)Bemessungswerte Einwirkungsdauer		
		kurz	mittel	ständig
Gussglas**	25	17,5	10,0	6,3
Drahtglas**	25	17,5	10,0	6,3
Float**	45	31,5	18,0	11,3
TVG	70	46,7	46,7	46,7
Emailliertes ESG-Glas	70	46,7	46,7	46,7
ESG	120	80,0	80,0	80,0
VSG aus				
Gussglas**	25	19,3	11,0	6,9
Drahtglas**	25	19,3	11,0	6,9
Float**	45	34,7	19,8	12,4
TVG	70	51,3	51,3	51,3
Emailliertes ESG-Glas	70	51,3	51,3	51,3
ESG	120	88,0	88,0	88,0

* Biegezugfestigkeiten nach Produktnormen oder AbZ

** Bei planmäßig unter Zugbeanspruchung stehenden Kanten dürfen nur 90 % der Zugfestigkeit angenommen werden

Tab. 21: Widerstandswerte f_k von Glaserzeugnissen [29]

Schubverbund

Für Verbundscheiben darf eine günstige Wirkung des Schubverbundes nicht angesetzt werden. Bei ungünstig wirkendem Schubverbund muss voller Verbund angenommen werden – Berechnungen siehe 5.1.1 unter Schubverbund [44].

Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$\frac{E_d}{R_d} \leq 1$$

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Durchbiegungen werden nur mit der seltenen (charakteristisch) Einwirkungskombination nach DIN 1055 berechnet.

Bauteil	Zul. Durchbiegung	Norm oder TR
linienförmig gelagerte Verglasung	$l/100$ der Stützweite*	DIN 18008-2
punktförmig gelagerte Verglasung	$l/100$ der Stützweite	TRPV

Tab. 22: Durchbiegungsbegrenzung [52, Tab.]

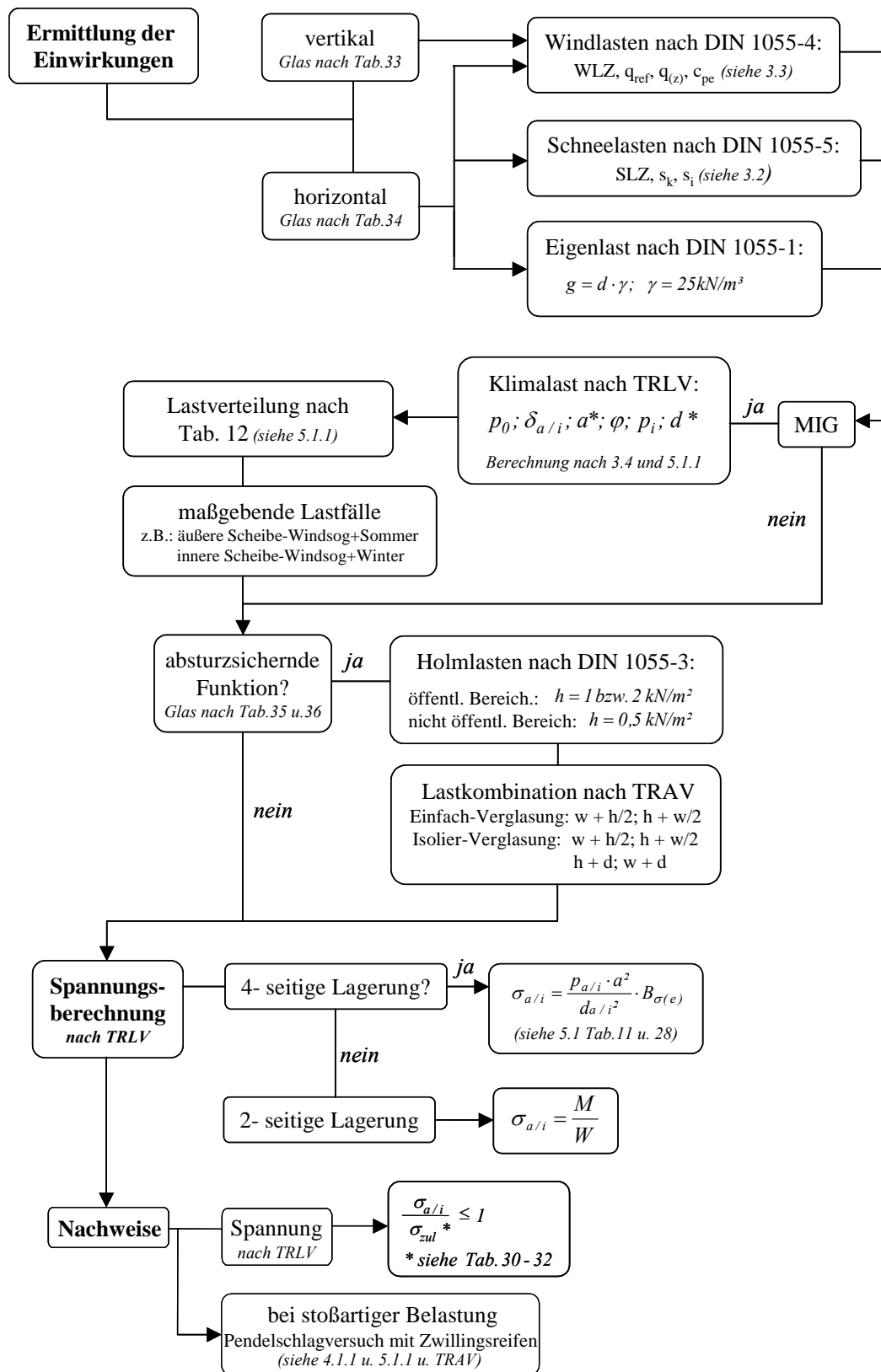
* Bei Vertikalverglasungen darf darauf verzichtet werden, wenn nachgewiesen ist, dass infolge Sehnenverkürzung eine Mindestauflagerbreite von 5 mm auch dann nicht unterschritten wird, wenn die gesamte Sehnenverkürzung auf nur ein Auflager gesetzt wird. Auf zusätzliche Anforderungen der Isolierglashersteller wird hingewiesen [44].

Resttragfähigkeit

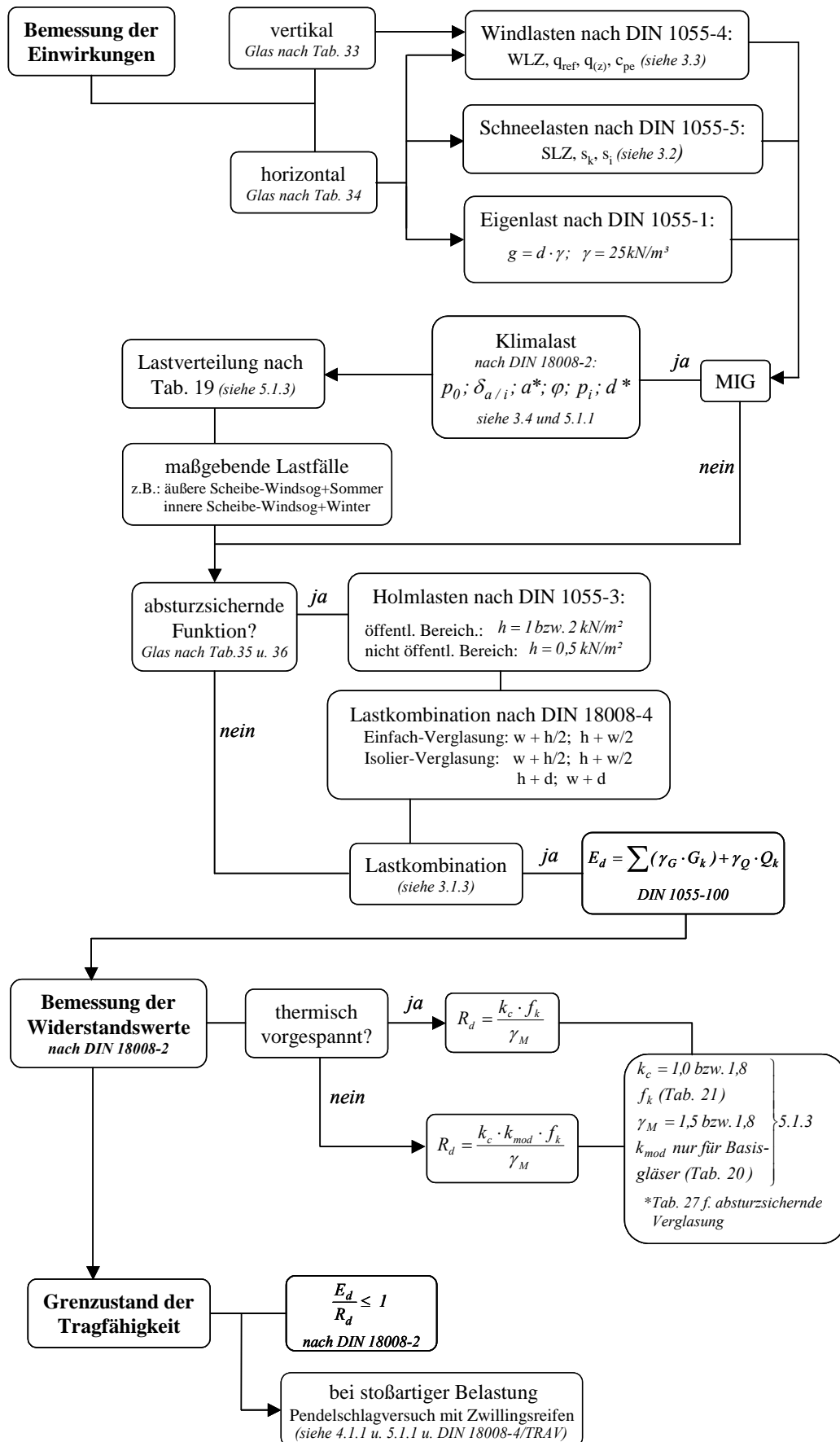
Experimentell wird der Zeitraum (Standzeit) vom Glasbruch bis zum vollständigen Versagen gemessen. Die Größe der Zusatzlast und die der Mindeststandzeit hängen vom Anwendungsbereich ab (Überkopf- oder begehbare Verglasung).

5.2 Nachweise nach Normen und Richtlinien

5.2.1 Technische Regeln



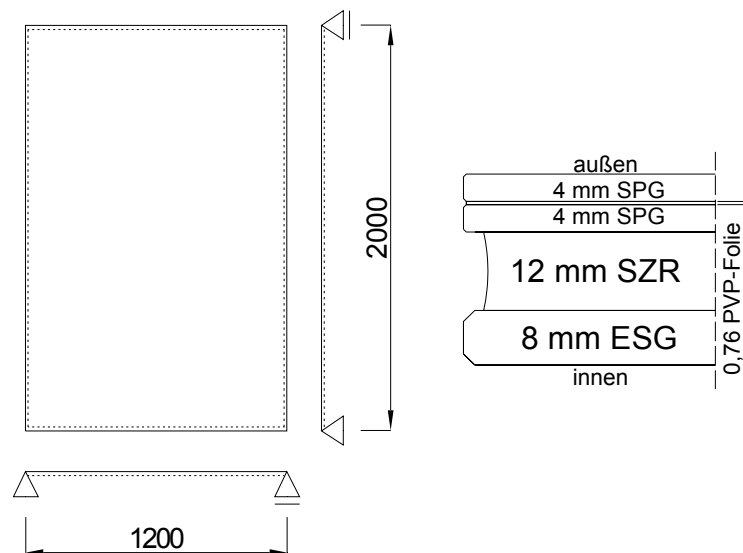
5.2.2 E DIN 18008: 2009-07



5.2.3 Beispiel

Ein Bürogebäude in Dresden soll neue Fenster mit allseitig gelagerten Mehrscheiben-Isolierglas erhalten. Das Gebäude hat eine Höhe von 12 m und einen rechteckigen Grundriss mit Seitenlängen von 10 bzw. 20 m. Die Verglasung dient als Absturzsicherung, Kategorie A und hat eine Höhe 2,0 m und eine Breite von 1,2 m. Der Aufbau von innen nach außen ist: 8 ESG/ 12 SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG. Somit muss nach TRAV; Tabelle 2 [41] kein zusätzlicher Nachweis für die Stoßsicherheit geführt werden. Die maßgebenden Einwirkungen zur Berechnung sind lediglich aus Klima- und Windlasten zu ermitteln.

Statisches System und Aufbau



Ermittlung der Einwirkung

a) Windlast

Standort: Dresden → Windlastzone 2, Binnenland → $q_{ref} = 0,39 \text{ kN/m}^2$

Gebäudehöhe: $h = z = 12 \text{ m}$

Gebäude ist allseitig geschlossen

Böengeschwindigkeitsdruck:

$$q_{(z)} = 1,7 \cdot q_{ref} \cdot (z/10)^{0,37} \quad 7 \text{ m} < z \leq 50 \text{ m}$$

$$q_{(z)} = 1,7 \cdot 0,39 \cdot (12/10)^{0,37} = \underline{0,71 \text{ kN/m}^2}$$

Außendruckbeiwert für Wände:

$$\theta = 90^\circ$$

$$e = b = 10\text{m}$$

$$e = 2 \cdot h = 24\text{m}$$

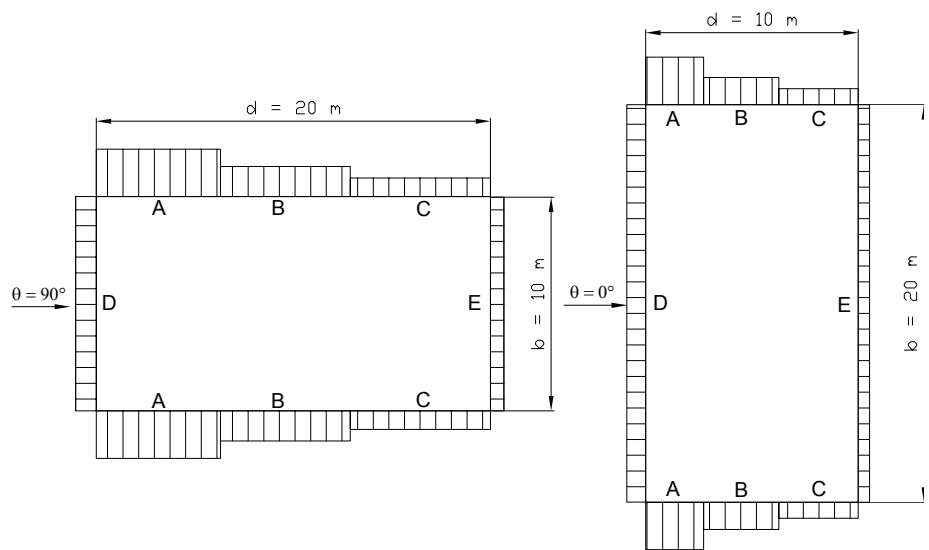
$$h/d = 12/20 = 0,6$$

$$\theta = 0^\circ$$

$$e = b = 20\text{m}$$

$$e = 2 \cdot h = 24\text{m}$$

$$h/d = 12/10 = 1,2$$



Maßgebend ist $\theta = 0^\circ$, Windsog im Bereich A:

	A	B	C	D	E
$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,8	-0,3
$c_{pe,1}$	-1,4	-1,1	-0,5	1,0	-0,5

Für die Berechnung der Glasscheibendicke muss der genaue c_{pe} - Wert ermittelt werden.

$$c_{pe} = c_{pe,1} + (c_{pe,10} - c_{pe,1}) \cdot \lg A$$

$$c_{pe} = -1,47 + (-1,2 - (-1,4)) \cdot \lg(2,0 \cdot 1,2) = -1,32$$

$$q_w = c_{pe} \cdot q_{(z)} = -1,32 \cdot 0,71 = -0,94 \text{ kN/m}^2$$

b) Klimalast

isochorer Druck: $p_0 = +/- 16 \text{ kN/m}^2$

Sommer/ Winter

Seitenverhältnis: $e = a / b = 1200 / 2000 = 0,6$

e	$B_f(e)$	$B_\sigma(e)$	B_v
0,6	0,0985	0,526	0,0421

	Ohne	Voll	
Schubverbund:	$d^* = \sqrt[3]{d_1^3 + d_2^3} = \sqrt[3]{4^3 + 4^3} = 5,04mm$	$d^* = d_1 + d_2 = 4 + 4 = 8mm$	
charakteristische Länge:	$a^* = 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{SZR \cdot d_a^3 \cdot d_i^3}{(d_a^3 + d_i^3) \cdot B_V}}$ $= 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{12 \cdot 5,04^3 \cdot 8^3}{(5,04^3 + 8^3) \cdot 0,0421}}$ $= 377,7\,mm$	$a^* = 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{12 \cdot 8^3 \cdot 8^3}{(8^3 + 8^3) \cdot 0,0421}}$ $= 475,0\,mm$	
Lastanteile:	$\delta_a = \frac{d_a^3}{d_a^3 + d_i^3} = \frac{5,04^3}{5,04^3 + 8^3} = 0,2$ $\delta_i = 1 - \delta_a = 1 - 0,2 = 0,8$	$\delta_a = \frac{8^3}{8^3 + 8^3} = 0,5$ $\delta_i = 1 - 0,5 = 0,5$	
Isolierglasfaktor:	$\varphi = \frac{l}{l + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} = \frac{l}{l + \left(\frac{1200}{377,7}\right)^4} = 0,0097$	$\varphi = \frac{l}{l + \left(\frac{1200}{475,0}\right)^4} = 0,024$	
Lastverteilung ohne Schubverbund:			
Lastangriff auf...	Einwirkung	Lastanteil äußere Scheibe	Lastanteil innere Scheibe
äußere Scheibe	Wind w	$(\delta_a + \varphi \cdot \delta_i) \cdot w$ $(0,2 + 0,0097 \cdot 0,8) \cdot (-0,94)$ $= -0,195$	$(1 - \varphi) \cdot \delta_i \cdot w$ $(1 - 0,0097) \cdot 0,8 \cdot (-0,94)$ $= -0,74$
beide Scheiben	Sommer	$-\varphi \cdot p_0$ $-0,0097 \cdot 16 = -0,16$	$\varphi \cdot p_0$ $0,0097 \cdot 16 = 0,16$
	Winter	$-\varphi \cdot (-p_0)$ $-0,0097 \cdot (-16) = 0,16$	$\varphi \cdot (-p_0)$ $0,0097 \cdot (-16) = -0,16$
Lastverteilung voller Schubverbund:			
Lastangriff auf...	Einwirkung	Lastanteil äußere Scheibe	Lastanteil innere Scheibe
äußere Scheibe	Wind w	$(0,5 + 0,024 \cdot 0,5) \cdot (-0,94)$ $= -0,48$	$(1 - 0,024) \cdot 0,5 \cdot (-0,94)$ $= -0,46$
beide Scheiben	Sommer	$-0,024 \cdot 16 = -0,38$	$0,024 \cdot 16 = 0,38$
	Winter	$-0,024 \cdot (-16) = 0,38$	$0,024 \cdot (-16) = -0,38$

	ohne Verbund	voller Verbund
maßgebende Lastfälle:	$p_a = \text{Windsog} + \text{Sommer}$ $= -0,195 + (-0,16) = -0,35 \text{ kN/m}^2$ $p_i = \text{Windsog} + \text{Winter}$ $= -0,74 + (-0,16) = -0,9 \text{ kN/m}^2$	$p_a = -0,48 + (-0,38)$ $= -0,86 \text{ kN/m}^2$ $p_i = -0,46 + (-0,38)$ $= -0,84 \text{ kN/m}^2$
Nach Technischen Regeln		
Spannungsberechnung		
	$\sigma_a = \frac{p_a \cdot a^2}{d_a^2} \cdot B_\sigma = \frac{0,00035 \cdot 1200^2}{5,04^2} \cdot 0,526$ $= 10,44 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_i = \frac{p_i \cdot a^2}{d_i^2} \cdot B_\sigma = \frac{0,0009 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 10,65 \text{ kN/m}^2$	$\sigma_a = \frac{0,00086 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 10,18 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_i = \frac{0,00084 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 9,94 \text{ kN/m}^2$
Spannungsnachweis		
	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{zul}} = \frac{10,44}{25,8} = 0,4 \leq 1$ $\frac{\sigma_i}{\sigma_{zul}} = \frac{10,65}{57,5} = 0,185 \leq 1$	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{zul}} = \frac{10,18}{25,8} = 0,39 \leq 1$ $\frac{\sigma_i}{\sigma_{zul}} = \frac{9,94}{57,5} = 0,17 \leq 1$
Nach DIN 18008		
Lastkombination nach DIN 1055-100		
	$E_{d,a} = \gamma_{Q,w} \cdot p_{k,i} + \psi \cdot \gamma_{Q,Klim a} \cdot p_{k,i}$ $= 1,5 \cdot (-0,195) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,16$ $= -0,44 \text{ kN/m}^2$ $E_{d,i} = 1,5 \cdot (-0,74) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,16$ $= -1,3 \text{ kN/m}^2$	$E_{d,a} = 1,5 \cdot (-0,48) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,38$ $= -1,0 \text{ kN/m}^2$ $E_{d,i} = 1,5 \cdot (-0,46) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 0,38$ $= -0,98 \text{ kN/m}^2$

	ohne Verbund	voller Verbund
Spannungsberechnung		
	$\sigma_{E_{d,a}} = \frac{E_{d,a} \cdot a^2}{d_a^2} \cdot B_\sigma = \frac{0,00044 \cdot 1200^2}{5,04^2} \cdot 0,526$ $= 13,12 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{E_{d,i}} = \frac{E_{d,i} \cdot a^2}{d_i^2} \cdot B_\sigma = \frac{0,0013 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 15,4 \text{ kN/m}^2$	$\sigma_{E_{d,a}} = \frac{0,001 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 11,8 \text{ kN/m}^2$ $\sigma_{E_{d,i}} = \frac{0,00098 \cdot 1200^2}{8^2} \cdot 0,526$ $= 11,6 \text{ kN/m}^2$
Bemessung der Widerstandswerte nach DIN18008-2 (siehe Tabelle 21)		
	$\sigma_{R_{d,a}} = 31,5 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{R_{d,i}} = 80,0 \text{ N/mm}^2$	
Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN18008-2		
	$\frac{\sigma_{E_{d,a}}}{\sigma_{R_{d,a}}} = \frac{13,12}{31,5} = 0,42 \leq 1$ $\frac{\sigma_{E_{d,i}}}{\sigma_{R_{d,i}}} = \frac{15,4}{80,0} = 0,19 \leq 1$	$\frac{11,8}{31,5} = 0,37 \leq 1$ $\frac{11,6}{80,0} = 0,15 \leq 1$

6 Bestimmung der Scheibendicken von MIG

6.1 Untersuchungsparameter

Die Untersuchungen über das Tragverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas erfolgt unter Berücksichtigung folgender Parameter:

Parameter	Symbol [Einheit]	Zuordnungswerte
Aufbau		
Scheibendicke innen	d_i [mm]	4; 6; 8; 10
Scheibendicke außen	d_a [mm]	4; 6; 8; 10
Kombinationen	d_i/d_a [-]	4/4; 6/6; 8/8; 10/10
Scheibenzwischenraum	SZR [mm]	16
Abmaße		
Höhe	b [m]	0,5; 0,6; 0,7;...;3,0
Breite	h [m]	0,5; 0,6; 0,7;...;5,0
Material		
Glas	-	SPG
SZR	-	Gas
Einwirkungen		
Veränderliche Lasten 1	q [kN/m ²]	0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0
Veränderliche Lasten 2	q [kN/m ²]	0,001; 0,002; ...; 3,0
Klimalast Sommer	p_0 [kN/m ²]	16
Klimalast Winter	p_0 [kN/m ²]	-16
Auswertung		
Ausnutzungsgrad	η_σ [%]	siehe Abschnitt 6.2

Tab. 23: Untersuchungsparameter

Alle Zuordnungswerte in Tab. 33 sind in der Kombinatorik berücksichtigt. Somit erfolgt die Untersuchung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von verschiedenen Lasten (Wind- und Klimalast) für eine variierende Scheibenhöhe und –breite (0,5 bis 3,0 bzw. 5,0 m). Durch die feine Einteilung in 0,1 m Schritten ist der Isolinienvverlauf für die Ausnutzungsgrade entsprechend abgestuft. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt ausschließlich für den Scheibenaufbau – 4SPG/ 16SZR/ 4SPG und 8SPG/ 16SZR/ 8SPG.

Im ersten Teil wird am Beispiel des Glasaufbaus 4SPG/ 16SZR/ 4SPG grafisch dargestellt, wie sich die Ausnutzung infolge der maximalen Klimalast oder einer veränderlichen Last ($q_w = 1 \text{ kN/m}^2$) zur Scheibengröße verhält. Der Ausnutzungsgrad berechnet sich dabei über die vorhandenen und zulässigen Spannung ($_{zul} \sigma_{SPG} = 18 \text{ N/mm}^2$).

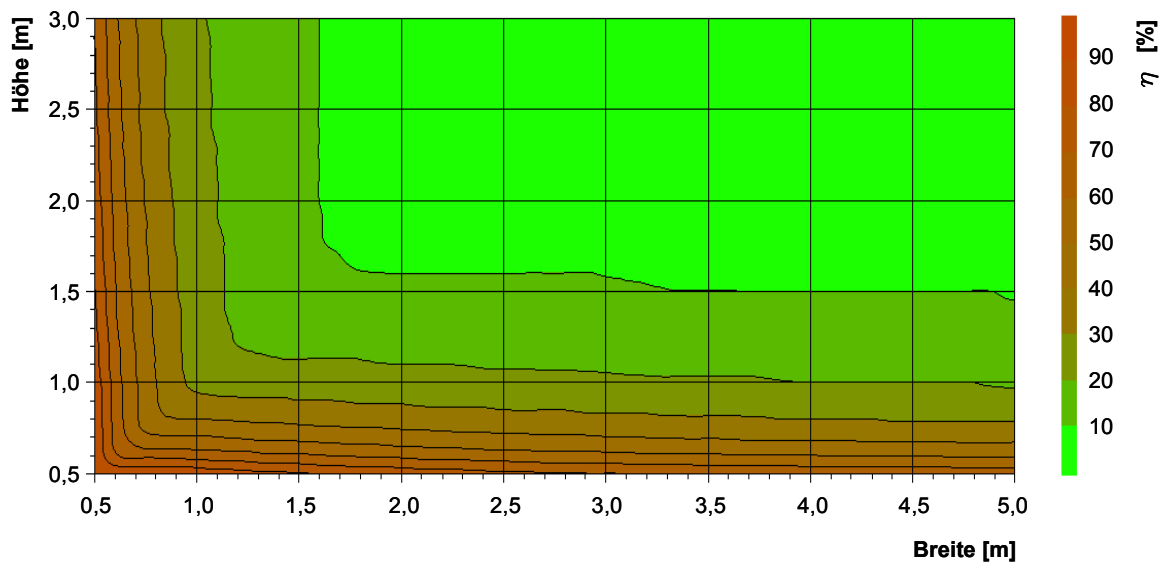


Bild 53: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Klimalast

Der Ausnutzungsgrad, wie in Bild 53 zusehen ist, fällt mit größeren Scheiben ab, da der Isolierglasfaktor den isochoren Druckes beeinflusst und von der Scheibenlänge abhängig ist.

$$\varphi = \frac{l}{l + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4}; \pm \varphi \cdot p_0 \quad (\text{siehe Abschnitt 3.6})$$

Je kleiner die Scheibe wird, desto größer wird φ und somit steigt der isochore Druck. Anders verhält es sich mit den Glasscheibendicken $d_{a/i}$. Sind diese dicker, werden die charakteristischen Längen a^* und der Isolierglasfaktor größer.

$$a^* = 28,9 \cdot \sqrt[4]{\frac{SZR \cdot d_a^3 \cdot d_i^3}{(d_a^3 + d_i^3) \cdot B_V}} \quad (\text{siehe Abschnitt 3.6})$$

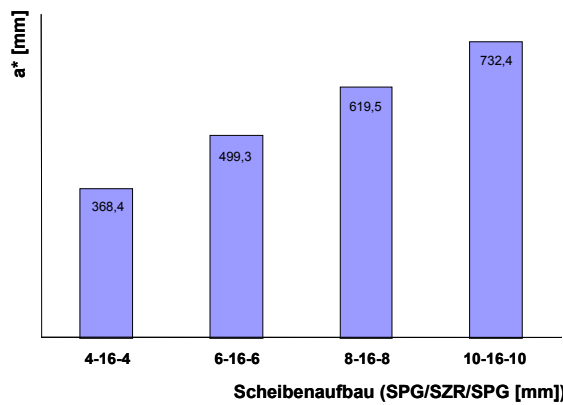


Bild 54: charakteristische Länge a^* in Abhängigkeit zur Glasscheibendicke

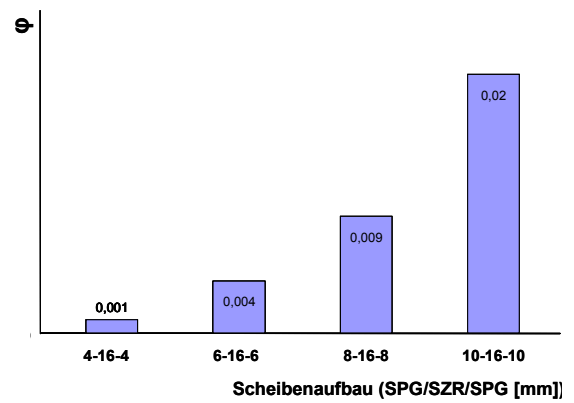


Bild 55: Isolierglasfaktor ϕ in Abhängigkeit zur Glasscheibendicke

Die Windlast führt bei größeren Glasflächen und abnehmenden Glasdicken auf eine Zunahme der Hauptspannungen und der Ausnutzungsgrade.

$$\sigma = \frac{p \cdot a^2}{d^2} \cdot B_{\sigma} ; \frac{\sigma}{\sigma_{zul}} \quad (\text{siehe Abschnitt 5.1})$$

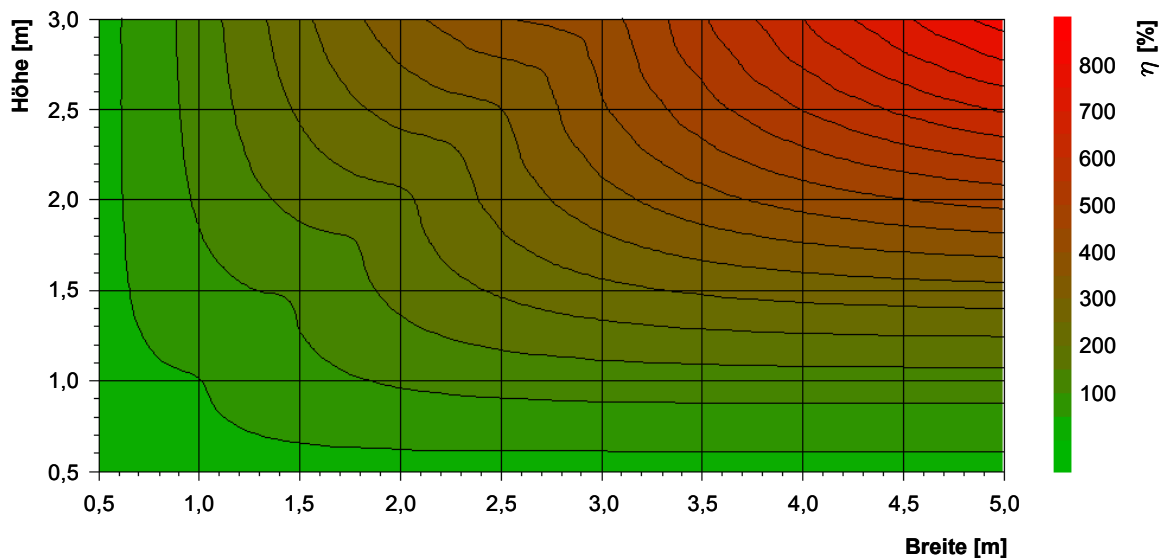


Bild 56: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Windlast

Für der Untersuchung der Tragfähigkeit mit Überlagerung der Einwirkungen dürfen die zulässigen Biegezugspannungen nach TRLV, Tabelle 2 im Allgemeinen um 15 % und bei Vertikalverglasungen mit Scheiben aus SPG und Glasflächen bis zu 1,6 m² im Besonderen um 25 % erhöht werden [8]. Somit können sich die maßgebenden Lasten oder Last-

kombinationen, in Abhängigkeit von der Scheibengröße, voneinander unterscheiden. Dies ermöglicht eine präzise Berechnung der Ausnutzung.

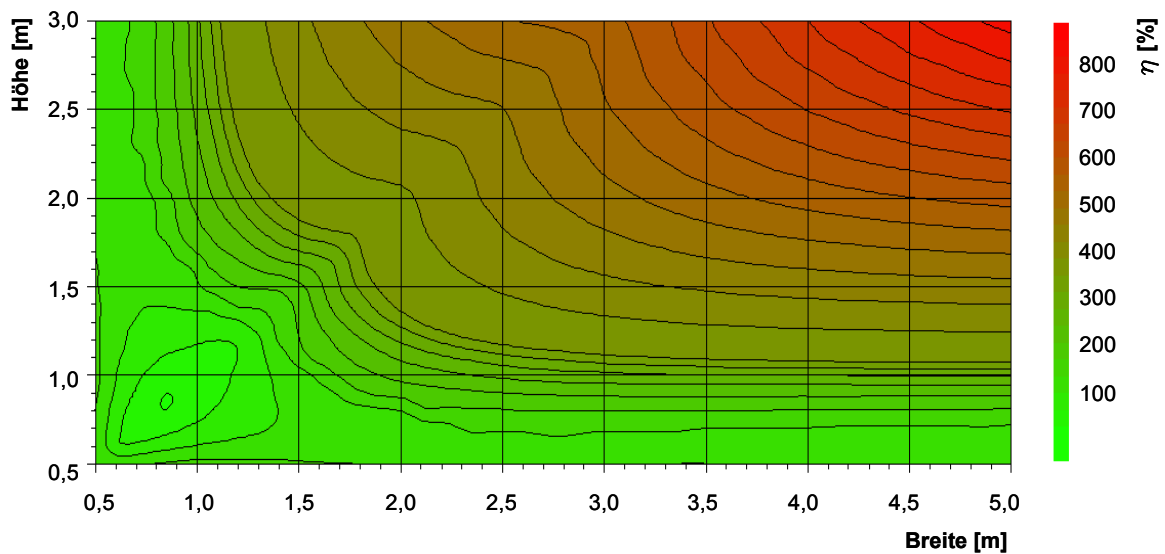


Bild 57: maximaler Ausnutzungsgrad η infolge Lastkombination Wind- und Klimlast

Anschließend werden ebenfalls für das Beispiel 4SPG/ 16SZR/ 4SPG Vorbemessungsdiagramme für spezielle Windlasten erstellt. Die Lasten für die Untersuchungen berechnen sich nach DIN 1055-4 [2] aus den maßgebenden Außendruckbeiwerten für vertikale Wände von Gebäuden und den Böengeschwindigkeitsdrücken für Bauwerke. Da alle Scheibengrößen mit einer Einheitslast berechnet werden, kann man die Ergebnisse für andere Lastgrößen schnell ermitteln und grafisch darstellen (siehe Abschnitt 6.2).

$$q_w = c_{pe} \cdot q_{(z)} \quad (\text{siehe Abschnitt 3.6})$$

Der abschließende Teil befasst sich mit der Ermittlung der maximalen Windlasten für jede Scheibengröße zwischen 0,5 bis 3,0 m Höhe und 0,5 bis 5,0 m Breite. Hierfür wird die Last schrittweise von 0 bis 3,0 kN/m² um 0,001 kN/m² mittels Rechentechnik bis zu einer Ausnutzung von 100% gesteigert. Die daraus resultierenden Maximallasten jeder Scheibe werden in Bemessungsdiagrammen für den Scheibenaufbau 4SPG/ 16SZR/ 4SPG und 8SPG/ 16SZR/ 8SPG grafisch dargestellt. Dadurch kann der Anwender schnell die maximal zulässigen Außendruckbeiwerte ermitteln, wenn die Windlastzone und somit der Böengeschwindigkeitsdruck $q_{(z)}$ bekannt sind.

Die Überprüfung der Bemessungsergebnisse erfolgte mit dem Programmsystem Üko Professional 3S [57] sowie mittels Kirchhoff'scher Plattentheorie.

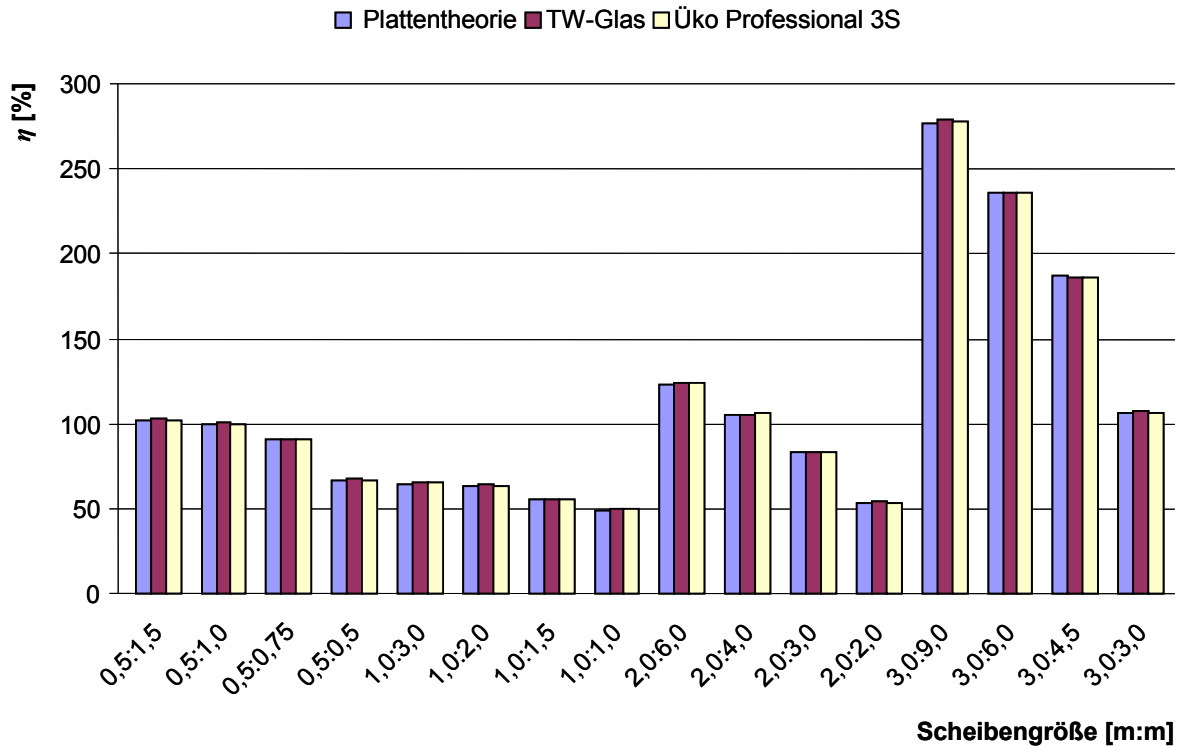


Bild 58: grafische Darstellung der Ergebnisunterschiede

Wie man anhand der Grafik erkennt, gibt es keine nennenswerten Unterschiede bei den Ergebnissen.

6.2 Ergebnisdarstellung der zu untersuchenden Varianten

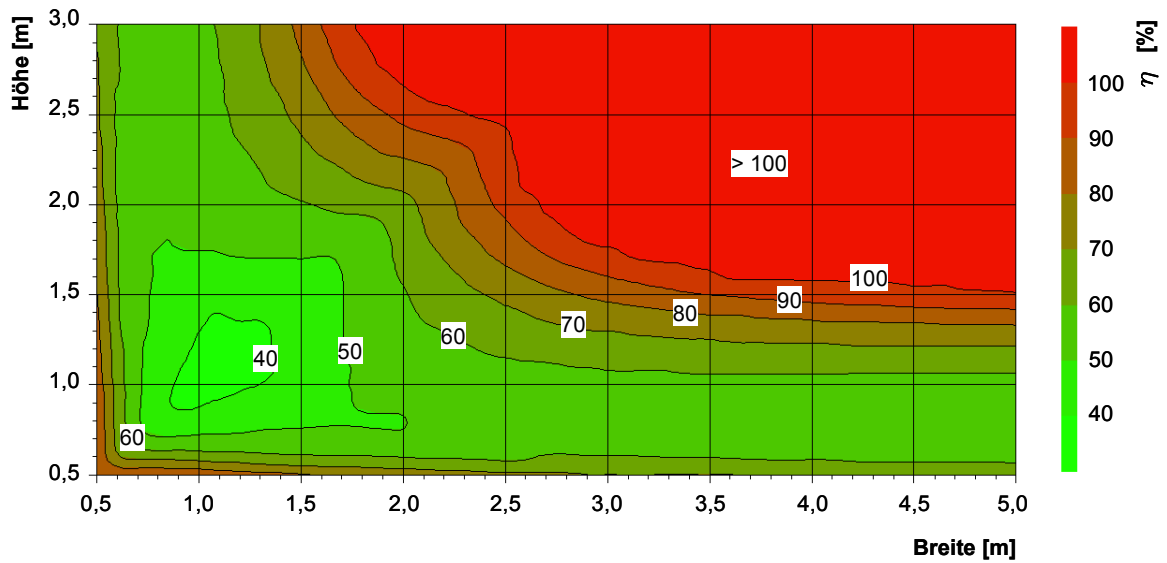


Bild 59: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 0,35 \text{ kN/m}^2$

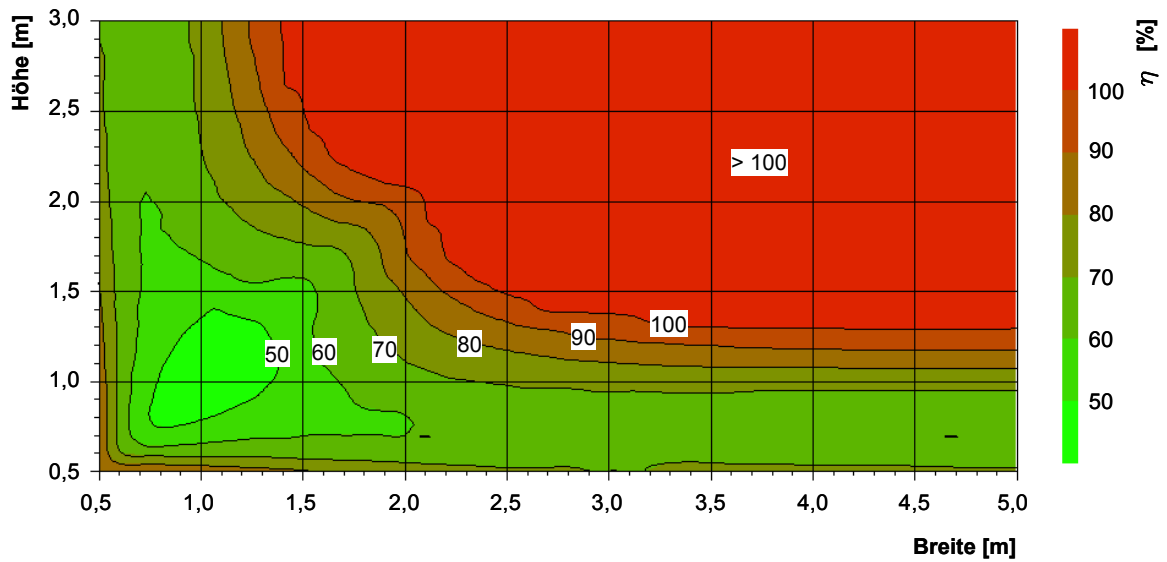


Bild 60: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 0,5 \text{ kN/m}^2$

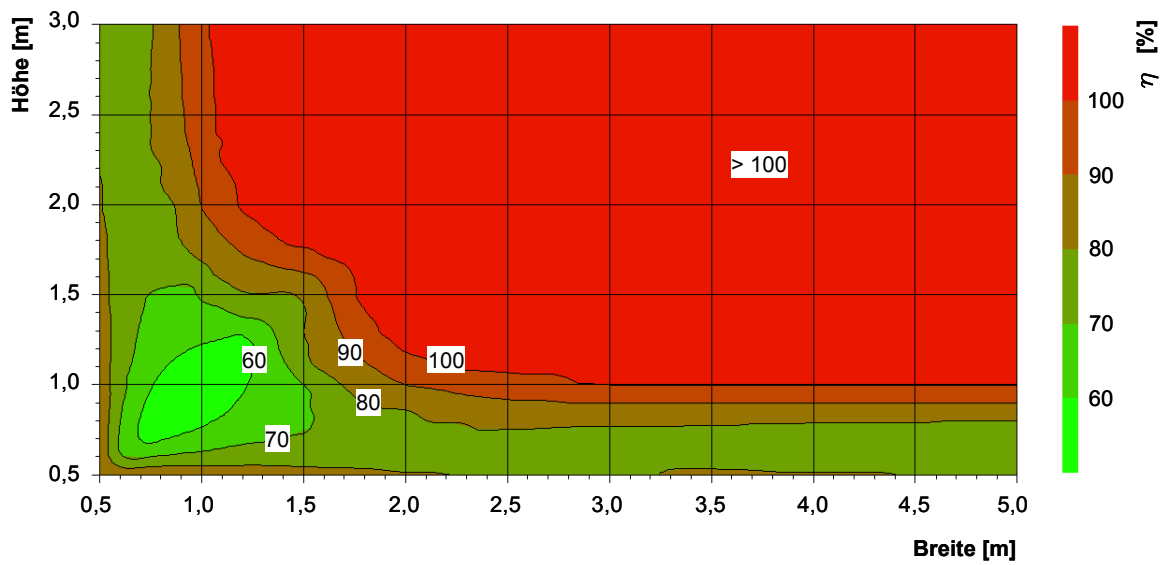


Bild 61: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 0,75 \text{ kN/m}^2$

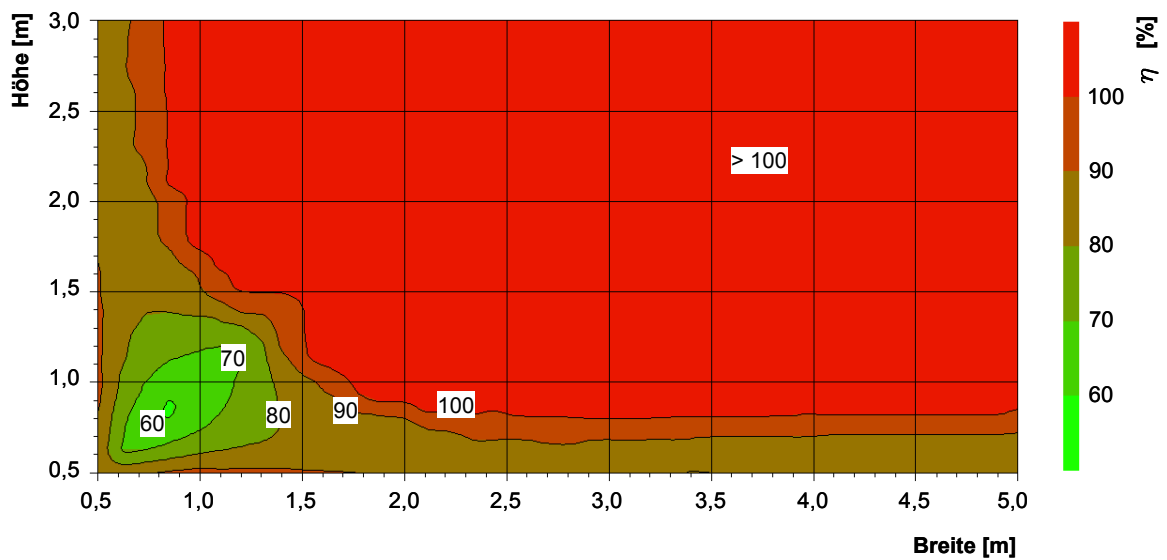


Bild 62: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 1,0 \text{ kN/m}^2$

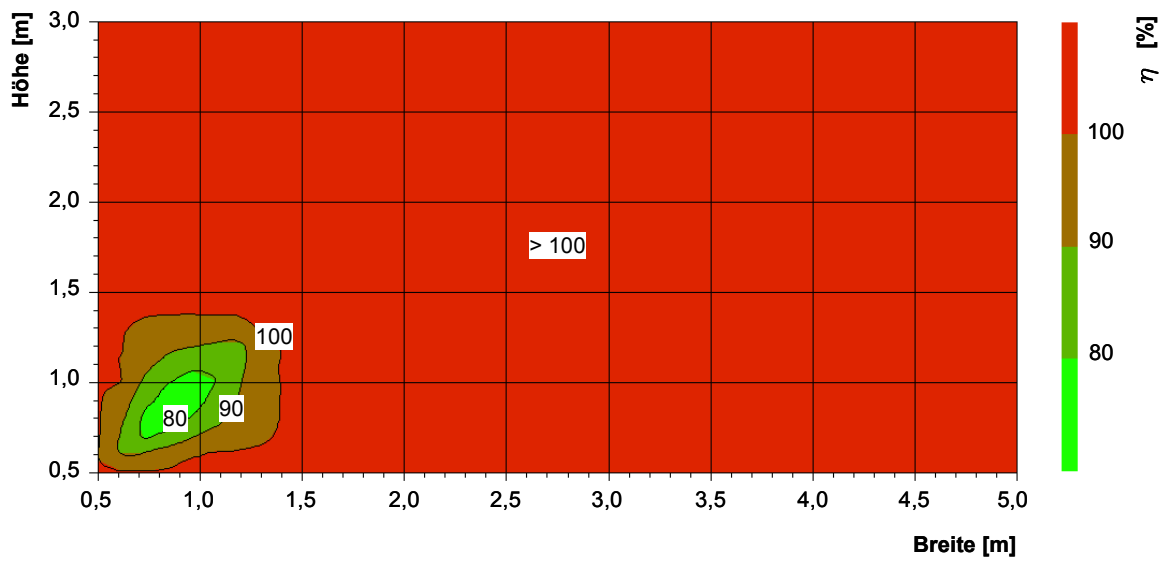


Bild 63: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 1,25 \text{ kN/m}^2$

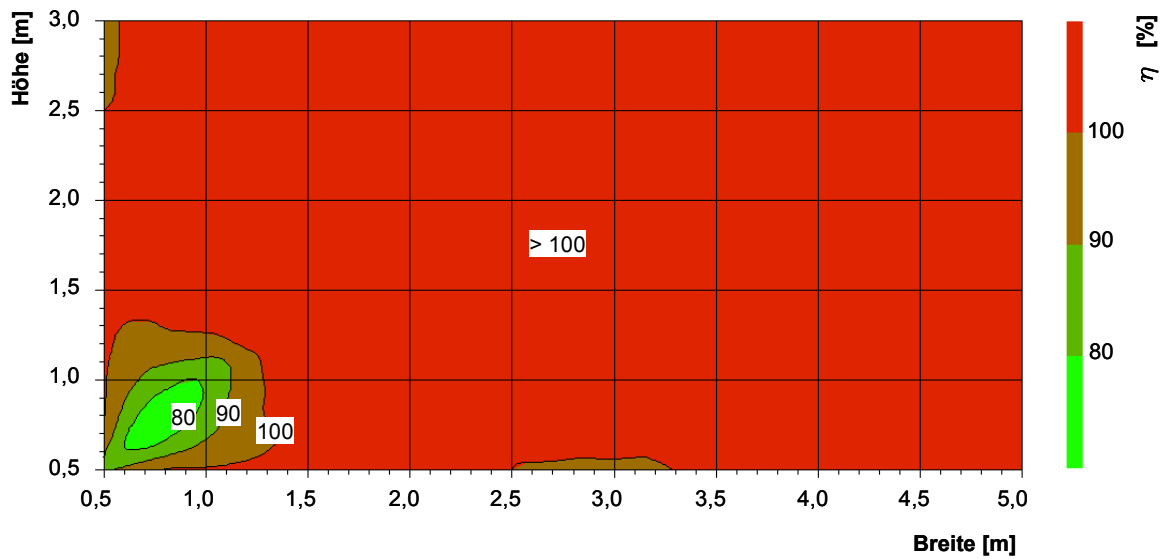


Bild 64: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 1,5 \text{ kN/m}^2$

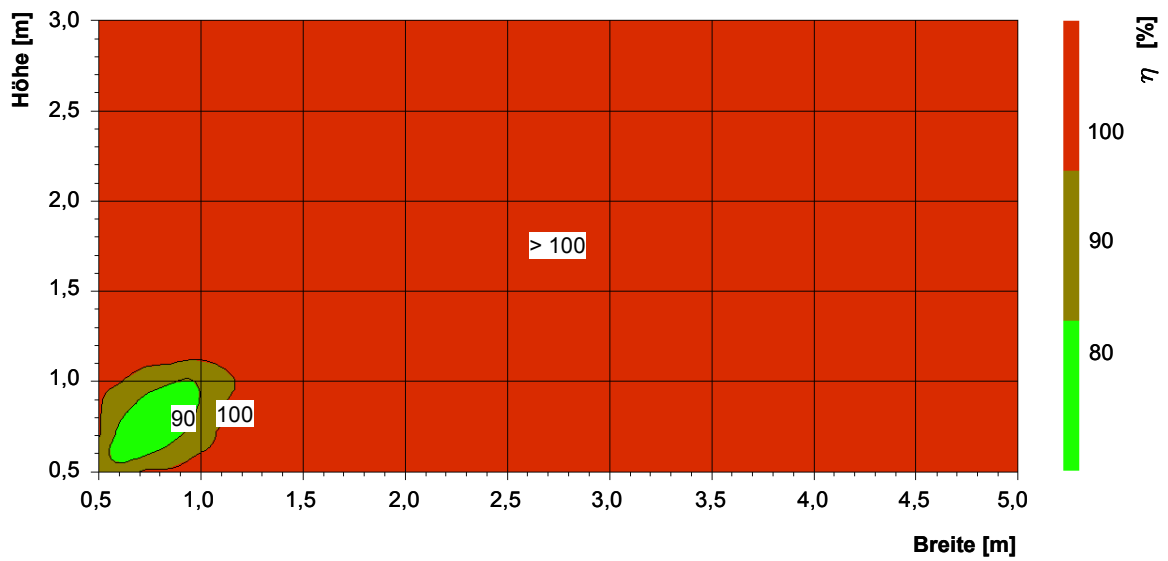


Bild 65: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 1,75 \text{ kN/m}^2$

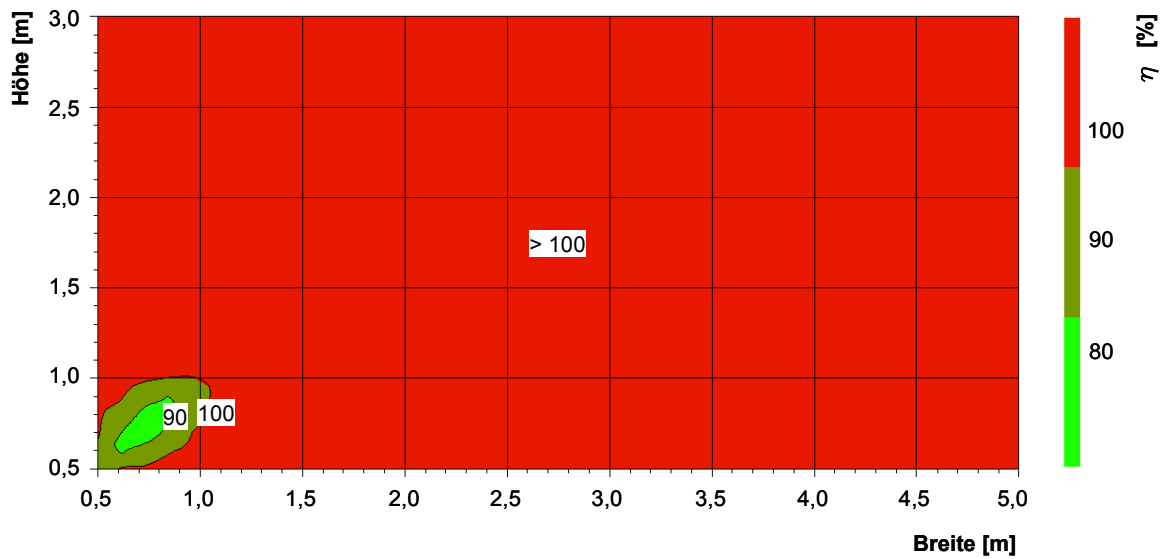


Bild 66: maximale Ausnutzung η infolge Klimlast und veränderlicher Last von $q_w = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Maximale Windlasten q_w [kN/m²] für den Scheibenaufbau 4SPG/ 16SZR/ 4SPG

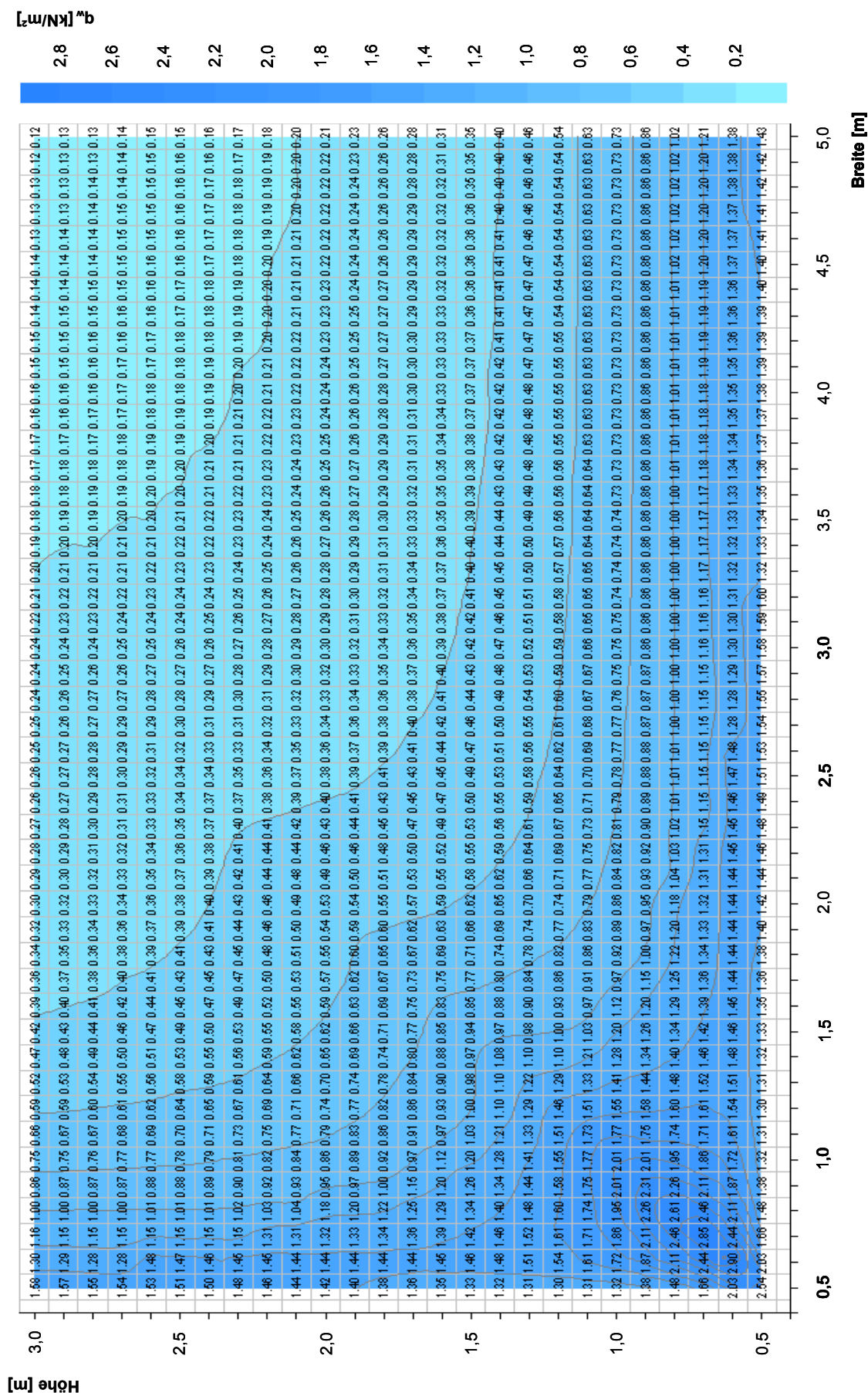


Bild 67: Bemessungsdiagramm $q_{w, max}$ für 4SPG/ 16SZR/ 4SPG

Maximale Windlasten q_w [kN/m²] für den Scheibenaufbau 8SPG/ 16SZR/ 8SPG

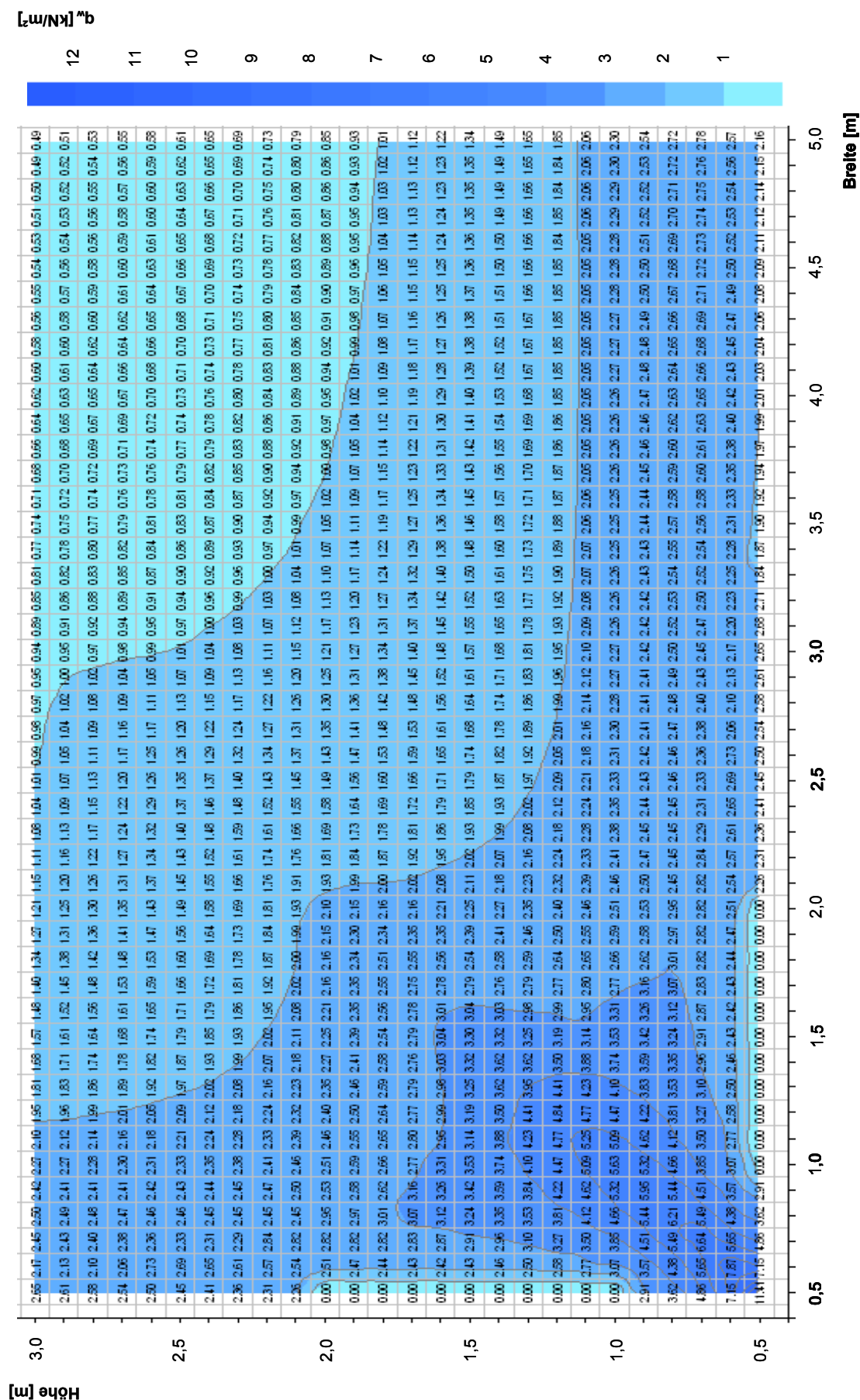


Bild 68: Bemessungsdiagramm $q_{w, max}$ für 8SPG/ 16SZR/ 8SPG

6.3 Auswertung

Die Grafiken lassen erkennen, dass wie oben schon genannt, die Ausnutzungen aus der maximalen Klimlast sowie aus der Windlast geometrieabhängig sind. Scheiben mit kleinen Abmaßen oder mit großen Scheibendicken sind gegen äußere Kräfte, wie Wind widerstandsfähiger als Scheiben mit großen Abmaßen oder kleinen Scheibendicken.

Aus dem Diagramm ist nicht mehr herauszulesen, welche Einwirkung maßgebend ist, da die Untersuchungen zu den Bemessungen mit Erhöhung der zulässigen Spannungen nach TRLV [8] erfolgten.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge der Mitarbeit zur Prüfung des Software-Programms TW-Glas [56], welches zur Erstellung von Glasstatiken entwickelt wurde. Die Arbeit veranschaulicht das Tragverhalten von allseitig linienförmig gelagerten Vertikalverglasungen mit Zweischeiben-Isolierglas unterschiedlicher Abmaße unter Variation wesentlicher Einflussparameter. Zudem zeigt die Arbeit handhabbare Diagramme für deren Bemessung auf.

Nach einem Einblick in den Aufbau und die Berechnung der Tragfähigkeit von Mehrscheiben-Isolierglas mit zwei unterschiedlichen Sicherheitskonzepten werden verschiedene Varianten von Isoliergläsern bemessen und ausgewertet. Für diese Untersuchung steht ein Glasstatik-Programm auf Grundlage der Finiten-Elementen-Methode zur Verfügung, welches nach verschiedenen Vorschriften die Bemessung durchführt.

Die durchgeführten Parameterstudien dienen zur Klärung der Einflüsse von maßgebenden Lasten auf die Tragfähigkeit von Mehrscheiben-Isolierverglasungen. Die Grundlagen bilden hier Standardscheibendicken. Als Normlast werden die Einheitslast $q = 1 \text{ kN/m}^2$ und die Klimabeanspruchung im Scheibeninneren nach TRLV [8] gewählt. Anhand der Standarddicken ist die Variation von Geometrieparametern möglich.

Nach Kenntnis wesentlicher Zusammenhänge und Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Mehrscheiben-Isolierverglasung ist es möglich Bemessungsdiagramme für Isolierglas mit rechteckiger Geometrie zu entwickeln, die dem praktisch tätigen Ingenieure hilfreich sind.

Anlage A

Rechenbeiwerte und zulässige Glasarten für die Technischen Regeln

Beiwerte der linearen Plattentheorie zur Berechnung von Spannung, Durchbiegung und charakteristischer Kantenlänge:

e	$B_f(e)$	$B_\sigma(e)$	B_v
1,0	0,0461	0,272	0,0194
0,9	0,0563	0,323	0,0237
0,8	0,0685	0,383	0,0288
0,7	0,0827	0,451	0,0350
0,67	0,0878	0,475	0,0372
0,6	0,0985	0,526	0,0421
0,5	0,1151	0,603	0,0501
0,4	0,1307	0,673	0,0587
0,33	0,1390	0,711	0,0646
0,3	0,1423	0,725	0,0676
0,2	0,1474	0,748	0,0767
0,1	0,1480	0,750	0,0857
0,0	0,1480	0,750	0,0947

Tab. 24: Beiwerte für linienförmig gelagerte Rechteckplatten [49]

Form	Länge a	$B_f(e)$	$B_\sigma(e)$	B_v
Gleichseitiges Dreieck	Kantenlänge	0,065	0,114	0,0025
Diagonal halbiertes Quadrat	Quadratkante	0,0475	0,128	0,0028
Kreis	Durchmesser	0,0472	0,303	0,0218

Tab. 25: Beiwerte für Sonderformen [49]

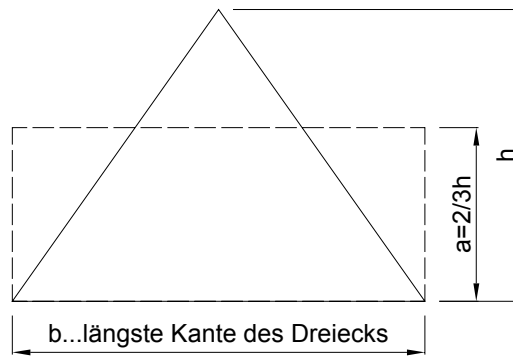


Bild 69: Transformation des Dreiecks [49]

Glassorte	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
ESG aus SPG	50	50
ESG aus Gussglas	37	37
emailliertes ESG aus SPG ²⁷	30	30
SPG	12	18
Gussglas	8	10
VSG aus SPG	15 ²⁸	22,5

Tab. 26: zulässige Biegespannungen für Einfach-Verglasungen in N/mm² [8]

Glassorte	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung	
		Glasfläche > 1,6 m ²	Glasfläche < 1,6 m ²
ESG aus SPG	57,5	57,5	62,5
ESG aus Gussglas	42,5	42,5	42,5
emailliertes ESG aus SPG ²⁵	34,5	34,5	37,5
SPG	13,8	20,7	22,5
Gussglas	9,2	11,5	11,5
VSG aus SPG	17,3(25,0) ²⁶	25,8	28,0

Tab. 27: zulässige Biegespannungen für Isolier-Verglasungen in N/mm² [8]

²⁷ Emaille auf der Zugseite

²⁸ Nur für die untere Scheibe einer Überkopfverglasung aus Isolierglas beim Lastfall "Versagen der oberen Scheibe" zulässig.

Glassorte	Einfach-Verglasung	Isolier-Verglasung	
		Glasfläche > 1,6 m ²	Glasfläche < 1,6 m ²
ESG aus SPG	50	57,5	62,5
ESG aus Gussglas	37	42,5	42,5
emailliertes ESG aus SPG ²⁵	30	34,5	37,5
SPG	18	20,7	22,5
Gussglas	10	11,5	11,5
VSG aus SPG	22,5	25,8	28,0

Tab. 28: zulässige Biegespannungen²⁹ für absturzsichernde Verglasungen in N/mm² [41]

	Baustoffe und Glaserzeugnisse
a	Spiegelglas nach Bauregelliste (BRL A) Teil 1, lfd. Nr.11.1
b	Gussglas: Drahtglas ¹⁾ , Ornamentglas oder Drahtornamentglas nach BRL A Teil 1, lfd. Nr.11.2
c	Einscheiben-Sicherheitsglas: ESG nach BRL A Teil 1, lfd. Nr.11.4.1 aus Glas a) oder b)
d	Heißgelagertes Einscheiben-Sicherheitsglas ²⁾ : ESG –H nach BRL A Teil 1, lfd. Nr.11.4.2, welches aus SPG nach a) hergestellt wurde
e	Teilvorgespanntes Glas: TVG nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung
f	Verbund-Sicherheitsglas: VSG aus Gläsern nach a) bis d) mit Zwischenfolien aus Polyvinyl-Butyral(PVB-Folie) nach BRL A Teil 1, lfd. Nr.11.8 oder aus anderen Gläsern und/oder mit anderen Zwischenschichten, deren Verwendbarkeit z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachgewiesen ist.
g	Verbundglas: VG aus Gläsern nach a) bis e) mit sonstigen Zwischenschichten
¹⁾ Kanten von Drahtglas dürfen nicht ständig der Feuchtigkeit ausgesetzt sein. Freie Kanten dürfen Bewitterung ausgesetzt sein, wenn die Abtrocknung nicht behindert ist. ²⁾ Für ein Glas der Zeilen a bis d ist ein Elastizitätsmodul von $E = 70000 \text{ N/mm}^2$, eine Querdehnzahl von $\nu = 0,23$ und ein thermischer Längenausdehnungskoeffizient von $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ anzunehmen. Im Weiteren gelten die physikalischen Eigenschaften nach DIN 1249-10 (8.90) und DIN 1249-12 (9.90).	

Tab. 29: Verwendbare Glaserzeugnisse für linienförmig gelagerte Verglasungen [52, Tafel 17.13a]

²⁹ Bei Glaserzeugnissen mit AbZ sind die zulässigen Biegezugspannungen dem Zulassungsbescheid zu entnehmen. Für den Nachweis „Ausfall Brüstungselement“ für Verglasungen der Kategorie B darf der 1,5-fache Wert der zul. Biegezugspannungen angesetzt werden.

		SPG	ESG-H	VSG aus			Draht- glas	Gussglas	VG
				SPG	ESG-H ¹⁾	TVG ²⁾			
Einfach-Verglasung				•		•	•		
Isolier- verglasung	obere Scheibe	•	•	•	•	•	•	•	•
	untere Scheibe			•		•	•		
¹⁾ Schließt die Verwendung von ESG gem. TRLV 3.3.2 ein ²⁾ Geregelt durch AbZ, siehe z.B. [17.13]. Für zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen, die nicht Tafel 17.13b entsprechen, sind neben den Tragfähigkeitsnachweisen i.d.R. auch Nachweise zur Resttragfähigkeit erforderlich. Können diese Nachweise nicht erbracht werden, sind Zusatzmaßnahmen (z.B. Netzunterspannungen) erforderlich. Da der Nachweis zur Resttragfähigkeit bislang nicht in den Technischen Regeln definiert ist, muss dieser durch Versuche erbracht werden.									

Tab. 30: Zulässige Glasarten bei linienförmig gelagerten Überkopfverglasungen [52, Tafel 17.13b]

Kategorie	Einfach- Verglasung	Isolier-Verglasung	
		stoßzugewandte Seite	stoßabgewandte Seite
A	VSG ³⁰	VSG ²⁸	Glas nach Tab. 28
		ESG ^{29,30}	VSG ²⁸
		VG aus ESG ^{29,30}	
B	VSG ²⁸	-	-
C1	VSG ²⁸	VSG	Glas nach Tab. 28
C2	ESG ^{31,32,33}	ESG ^{29,30}	
C3	VSG ²⁸	VSG	Glas nach Tab. 28
		ESG ^{29,30}	
		VG aus ESG ^{29,30}	

Tab. 31: Zulässige Glasarten für absturzsichernde Verglasung [52, Tafel 7.65]

³⁰ Die Dicke der verwendeten Glastafeln dürfen max. um den Faktor 1,5 voneinander abweichen.

³¹ Anwendungsbereiche, für die nach TRLV heißlagerungsgeprüftes ESG (ESG-H) vorgesehen ist, sind auch für absturzsichernde Verglasungen in ESG-H auszuführen.

³² thermisch vorgespanntes Borosilikatglas mit AbZ darf in den technischen Regeln für absturzsichernde Verglasungen für Anwendungsbereiche von ESG verwendet werden.

³³ Nur zulässig bei allseitig linienförmiger Lagerung.

Kat.	Typ	Linienförmige Lagerung	Breite [mm]		Höhe [mm]		Glasaufbau [mm] (von innen* nach außen)			
			min.	max.	min.	max.				
1	2	3	4	5	6	7	8			
A	MIG	Allseitig	500	1300	1000	2000	8 ESG/ SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG		1	
			1000	2000	500	1300	8 ESG/ SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG		2	
			900	2000	1000	2100	8 ESG/ SZR/ 5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG		3	
			1000	2100	900	2000	8 ESG/ SZR/ 5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG		4	
			1100	1500	2100	2500	5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG/ SZR/ 8 ESG		5	
			2100	2500	1100	1500	5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG/ SZR/ 8 ESG		6	
			900	2500	1000	4000	8 ESG/ SZR/ 6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		7	
			1000	4000	900	2500	8 ESG/ SZR/ 6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		8	
			300	500	1000	4000	4 ESG/ SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG		9	
			300	500	1000	4000	4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG/ SZR/ 4 ESG		10	
	Einfach	Allseitig	500	1200	1000	2000	6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		11	
			500	2000	1000	1200	6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		12	
			500	1500	1000	2500	8 SPG/ 0,76 PVB/ 8 SPG		13	
			500	2500	1000	1500	8 SPG/ 0,76 PVB/ 8 SPG		14	
			1200	2100	1000	3000	10 SPG/ 0,76 PVB/ 10 SPG		15	
			1000	3000	1200	2100	10 SPG/ 0,76 PVB/ 10 SPG		16	
			300	500	500	3000	6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		17	
C1 und C2	MIG	Allseitig	500	2000	500	1000	6 ESG/ SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG		18	
			500	1300	500	1000	4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG/ SZR/ 6 ESG		19	
	Einfach	Zweiseitig, oben u. unten	1000	Bel.	500	1000	6 ESG/ SZR/ 5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG		20	
		Allseitig	500	2000	500	1000	5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG		21	
			1000	Bel.	500	800	6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		22	
			800	Bel.	500	1000	5 ESG/ 0,76 PVB/ 5 ESG		23	
		Zweiseitig, oben u. unten	800	Bel.	500	1000	8 SPG/ 1,52 PVB/ 8 SPG		24	
			Zweiseitig, links u. rechts	500	800	1000	1100	6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG		25
				500	1000	800	1100	6 ESG/ 0,76 PVB/ 6 ESG		26
				500	1000	800	1100	8 SPG/ 1,52 PVB/ 8 SPG		27
C3	MIG	Allseitig	500	1500	1000	3000	6 ESG/ SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG		28	
			500	1300	1000	3000	4 SPG/ 0,76 PVB/ 4 SPG/ SZR/ 12 ESG		29	
	Einfach	Allseitig	500	1500	1000	3000	5 SPG/ 0,76 PVB/ 5 SPG		30	

* : Mit „innen“ ist die Angriffsseite, mit „außen“ die Absturzseite der Verglasung gemeint

MIG: Mehrscheiben-Isolierverglasung

SZR: Scheibenzwischenraum, mindestens 12 mm

SPG: Spiegelglas (Float-Glas)

ESG: Einscheiben-Sicherheitsglas aus Spiegelglas

PVB: Polyvinyl-Butyral-Folie

Tab. 32: Linienförmig gelagerte Glasaufbauten mit nachgewiesener Stoßsicherheit [41, Tab.2]

Rechenbeiwerte und zulässige Glasarten für die E DIN 18008: 2009-07

Kategorie	Einfach- Verglasung	Isolier-Verglasung	
		stoßzugewandte Seite	stoßabgewandte Seite
A	VSG ³⁴	VSG ²⁸	VSG ²⁸
		ESG ^{29,30}	
B	VSG ²⁸	-	-
C1	VSG ²⁸	VSG	Glas nach Tab. 28
C2	ESG-H ^{35,36,37}	ESG ^{29,30}	
C3	VSG ²⁸	VSG	VSG ²⁸
		ESG ^{29,30}	

Tab. 33: Zulässige Glasarten für absturzsichernde Verglasung [29]

³⁴ Die Dicke der verwendeten Glastafeln dürfen max. um den Faktor 1,5 voneinander abweichen.

³⁵ Anwendungsbereiche, für die nach TRLV heißlagerungsgeprüftes ESG (ESG-H) vorgesehen ist, sind auch für absturzsichernde Verglasungen in ESG-H auszuführen.

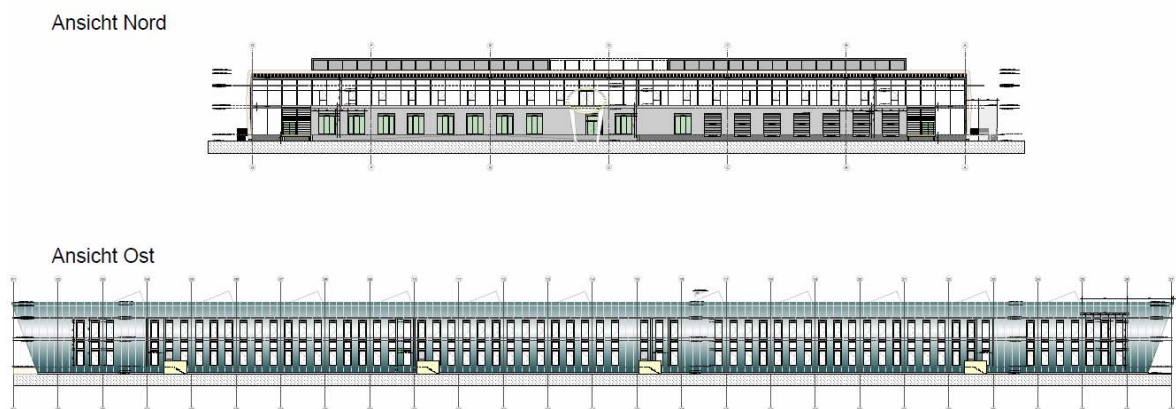
³⁶ thermisch vorgespanntes Borosilikatglas mit AbZ darf in den technischen Regeln für absturzsichernde Verglasungen für Anwendungsbereiche von ESG verwendet werden.

³⁷ Nur zulässig bei allseitig linienförmiger Lagerung.

Anlage B

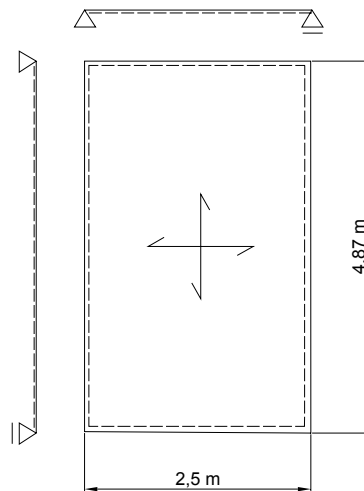
Beispiel

Die Fassade Technologieparks bei Kassel soll mit Mehrscheiben-Isolierverglasung ausgestattet werden. Die Firma Schüco Fassadentechnik soll für den Generalunternehmer einen Konstruktionsvorschlag erstellen. Sie erhielten vom Glasscheibenhersteller lediglich eine Empfehlung der zu verwendende Scheibendicke. Um die Fensterprofilen optimieren zu können erteilten sie dem Ingenieurbüro Trag Werk Dresden den Auftrag mit ihrer Glasstatik-Software TW-Glas eine Vorbemessung der Glasdicken zu erstellen.



Die vertikale Isolierverglasung dieses Beispiels dient teilweise der Absturzsicherung und muss somit in zwei verschiedenen Varianten ausgeführt und für die maßgebenden Einwirkungskombinationen aus Wind- und Klimalast bemessen werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Biegezugspannungen nach TRLV bei Überlagerung von Klimalast und Einwirkung nach den Technischen Baubestimmungen um 15% erhöht werden dürfen. Der Nachweis der Stoßsicherheit muss über ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis erbracht werden, da die Abmaße nach TRAV, Tab. 2 zu groß sind. Die Untersuchungen für beide Varianten erfolgten im Rand- sowie im Mittenbereich des Gebäudes. Die linienförmige Lagerung muss beidseitig normal zur Scheibenebene wirken. Der U_g -Wert des Glases von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ sollte dabei eingehalten werden. Daher wurde ein SZR von 16 mm gewählt.

Statisches System



Die vertikale Verglasung ist allseitig linienförmig gelenkig gelagert. Die Auflagersituation am Randverbund wird als frei drehbar angenommen. Auf die Berücksichtigung des Glaseinstandes wird verzichtet, so dass die Spannweiten $l_x = 2,5 \text{ m}$ und $l_y = 4,87 \text{ m}$ angenommen werden.

Einwirkungen

Die Berechnungen der Lasten aus Klima und Wind und deren Kombinatorik erfolgt über die Software *mb Baustatik S027*

Entwurf

a) Mehrscheiben-Isolierglas aus Float:

- Vorgeschlagener Scheibenaufbau (von innen nach außen): 10 SPG/ 16 SZR/ 12 SPG

Randbereich: Bereich A — Windsog: $w = -0,67 \text{ kN/m}^2$

Bereich D — Winddruck: $w = 0,39 \text{ kN/m}^2$

Mittenbereich: Bereich C — Windsog: $w = -0,28 \text{ kN/m}^2$

Bereich D — Winddruck: $w = 0,39 \text{ kN/m}^2$

Glasaufbau: innen – außen
8 SPG / 16 SZR / 10 SPG

d_i [mm] d_a [mm]	η_σ [%]	f [mm]
10	55	19
12	61	18
10	69	24
10	69	24
8	73	32
10	92	30
6	68	40
10	114	36
8	108	44
8	108	44

Tab. 34: Empfehlung für den Randbereich

Glasaufbau: innen – außen
6 SPG / 16 SZR / 8 SPG

d_i [mm] d_a [mm]	η_σ [%]	f [mm]
6	43	25
10	66	21
8	63	27
8	63	27
6	66	38
8	89	36
6	112	60
6	112	60

Tab. 35: Empfehlung für den Mittenbereich

b) Mehrscheiben-Isolierglas aus ESG innen und VSG außen:

- Vorgeschlagener Scheibenaufbau (von innen nach außen):

10 ESG/ 16 SZR/ 8 SPG/ 0,76 PVB/ 8 SPG

Randbereich: Bereich A — Windsog: $w = -0,67 \text{ kN/m}^2$

Bereich D — Winddruck: $w = 0,39 \text{ kN/m}^2$

Mittenbereich: Bereich C — Windsog: $w = -0,28 \text{ kN/m}^2$

Bereich D — Winddruck: $w = 0,39 \text{ kN/m}^2$

Nachweise, siehe im Anhang B.

Glasaufbau: innen – außen
8 ESG/ 16 SZR/ 6 SPG/ 0,76 PVB/ 6 SPG

d _i d _{a2} d _{a1} [mm]	η _σ [%]		f [mm]	
	Ohne Verbund	Voller Verbund	Ohne Verbund	voller Verbund
10	25	13	24	13
8	44	20	24	8
8	44	32	24	5
10	35	20	31	19
6	47	27	34	14
6	46	43	34	15
8	42	19	47	23
6	71	31	48	17
6	70	52	48	17
8	52	26	57	32
5	73	37	60	24
5	73	63	60	24
6	64	25	94	40
5	119	46	93	29
5	119	79	93	29
8	62	39	67	44
4	69	42	71	34
4	69	72	71	34

Tab. 36: Empfehlung für den Randbereich

Glasaufbau: innen – außen
8 ESG/ 16 SZR/ 4 SPG/ 0,76 PVB / 4 SPG

d _i [mm] d _{a2} [mm] d _{a1} [mm]	η _σ [%]		f [mm]	
	Ohne Verbund	Voller Verbund	Ohne Verbund	Voller Verbund
6	57	15	56	25
5	69	46	56	17
5	69	33	56	17
8	36	23	40	27
4	41	42	43	21
4	40	31	43	21
6	51	24	74	38
4	75	59	76	27
4	75	42	76	27
4	61	20	132	48
4	135	75	130	33
4	134	53	130	33

Tab. 37: Empfehlung für den Mittenbereich

Literatur

- [1] DIN 1055-1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002
- [2] DIN 1055-4: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005
- [3] DIN 1055-5: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schneelasten. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005
- [4] Liste der eingeführten Technischen Baubestimmungen. Februar 2010
- [5] Sedlacek, G.; Blank, K.; Laufs, W.; Güsgen, J.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn, 1999
- [6] Weller, Nicklisch, Thieme, Weimar: Glasbau – Praxis: Konstruktion und Bemessung. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2009
- [7] Feldmeier, F.: Klimabelastung und Lastverteilung bei Mehrscheiben-Isolierglas. In Stahlbau 75 (2006), Heft 6
- [8] DIBt: Technische Regeln für die Verwendung linienförmig gelagerter Verglasungen, Schlussfassung. Berlin: Mitteilung des Deutschen Institut für Bautechnik, 2006
- [9] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001
- [10] WWW.BAUNETZWISSEN.DE:
- [11] E DIN 18008: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006
- [12] DIN 1286: Mehrscheiben - Isolierglas – Teil 1: luftgefüllt, Zeitstandverhalten, Überwachung. Teil 2: gasgefüllt, Zeitstandverhalten, Grenzabweichungen des Gasvolumens. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1994
- [13] www.glas-strack.de: Produktion: Isolierglas
- [14] Schittich, Staib, Balkow, Schuler, Sobek: Glasbau Atlas – Teil 2: Grundlagen - Isolierglas. München: Institut für internationale Architektur – Dokumentation GmbH, 1998

- [15] Wörner, J.-D.; Schneider, J.; Fink, A.: Glasbau - Grundlage, Berechnung, Konstruktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001
- [16] Siebert, G: Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [17] Institut des Glaserhandwerks: Technische Richtlinien für Verglasungstechnik und Fensterbau, Hadamar. Schondorf: Karl Hoffmann Verlag, 1988, 1996
- [18] www.as-fensterbau.de: Beeinflussung des Schalldämmmaßes
- [19] DIBt: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Allgemeine Bestimmungen
- [20] www.bazdigital.de
- [21] www.dibt.de
- [22] www.bauordnungen.de: Musterbauordnung
- [23] www.interver-special.com: Sicherheit
- [24] <http://ec.europa.eu>
- [25] Landesdirektion Leipzig – Landesstelle für Bautechnik: Allgemeines Merkblatt zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall gemäß § 20 Abs. 1 oder § 21 Abs. 1 Nr. 2 Sächsische Bauordnung (SächsBO)
- [26] DIBt - Mitteilungen 02/2001: Anforderungen an begehbare Verglasungen; Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren. Berlin: März 2000
- [27] www.BAULINKS.de: Bauregelisten
- [28] [www. glaskontor-erfurt.de](http://www.glaskontor-erfurt.de)
- [29] Matzik, M.: TU Harburg: Skript – konstruktiver Glasbau. Harburg, WS 2009/ 2010.
- [30] DIN 4426: Einrichtung zur Instandhaltung baulicher Anlagen, sicherheitstechnische Anforderungen an Arbeitsplätze und Verkehrswege. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2001
- [31] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften: GS-BAU-18: Grundsätze für die Prüfung und Zertifizierung der bedingten Betretbarkeit oder Durchsturzicherheit von Bauteilen bei Bau- oder Instandhaltungsarbeiten Einrichtungen zur Instandhaltung baulicher Anlagen. Karlsruhe: Februar 2001
- [32] Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Maier: Merkblatt RR - Nachweis der Stoßicherheit und

Resttragsicherheit von Überkopfverglasungen: Hinweise zu Anforderungen, Versuchsdurchführung und Gutachten, 2003

- [33] DIBt: Technische Regeln für die Bemessung und Anwendung punktförmig gelagerter Verglasungen, Schlussfassung. Berlin: Mitteilung des Deutschen Institut für Bautechnik, 2006
- [34] Technische Richtlinien der NürnbergMesse 2010. Nürnberg, Stand 2009
- [35] www.eurocode.at
- [36] www.ce-zeichen.de
- [37] www.gesetze-im-internet.de
- [38] <http://wecobis.iai.fzk.de>
- [39] Handwerkskammer für München und Oberbayern: Technische Regeln – Begriffe und allgemeine Zusammenhänge. München
- [40] www.baua.de
- [41] DIBt: Technische Regeln für die Verwendung von Absturzsichernde Verglasungen, Schlussfassung. Berlin: Mitteilung des Deutschen Institut für Bautechnik, 2006
- [42] Landesdirektion Leipzig – Landesstelle für Bautechnik: Arbeitsblatt 2 - Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen. Stand 20.08.2008
- [43] DIN 1259: Glas – Teil 2: Begriffe für Glaserzeugnisse. Ausgabe 2001,09
- [44] Ofner, R: TU Graz - Institut für Stahlbau und Flächentragwerke: Skript – Leichtbau und Glasbau. Graz, 2007.
- [45] www.mwoffice.de
- [46] DIBt: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-55. Berlin, 2002
- [47] DIN 1249-10: Flachglas im Bauwesen – Chemische und physikalische Eigenschaften. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990
- [48] Laufs, T.: (FH) Mittweida: Umdruck – Glas- und Aluminiumbau: Abschnitt – Bauelemente und Konstruktionen aus Glas. Roßwein, 2008
- [49] VDI-Gesellschaft-Bautechnik (Hrsg): Bauen mit Glas. VDI-Berichte 1527. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 2000

- [50] www.gpp-glas.com
- [51] Shen, X.: Entwicklung eines Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes für den Glasbau. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 4, Nr. 138, 1997
- [52] DIN 18008: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009
- [53] Schneider, J.: Bautabellen für Ingenieure – 17. Auflage. Neuwied: Werner Verlag GmbH, 2006
- [54] www.konstruktiver-glasbau.at
- [55] www.glassinsulation.de
- [56] Trag Werk Software, Döking + Purtak GbR: TW Glas, ein Programmsystem zur Glasdickenberechnung
- [57] Sommer Informatik GmbH: Üko Professional 3S, ein Programmsystem zur Glasdickenberechnung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 19. November 2010

Martin Kunze